

Mikko Risku

Suuritehoisen taajuusmuuttajan verkkoliityntä voimantuotannossa

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 16.4.2012.

Työn valvoja:

Professori Matti Lehtonen

Työn ohjaaja:

DI Jouko Esko

Tekijä: Mikko Risku

Työn nimi: Suuritehoisen taajuusmuuttajan verkkoliityntä voimantuotannossa

Päivämäärä: 16.4.2012

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 8+87

Sähkötekniikan laitos

Professuuri: Sähköverkot ja suurjännitetekniikka

Koodi: S-18

Valvoja: Professori Matti Lehtonen

Ohjaaja: DI Jouko Esko

Taajuusmuuttajien käyttäminen alkaa olla kannattavaa yhä useammissa sovelluksissa ja yhä suuremmilla tehoilla. Tässä diplomityössä tutkitaan taajuusmuuttajatekniikan nykyistä käytettävyyttä kymmenien megawattien tehoisissa voimantuotantolaitoksissa. Tutkimuksen kohteina ovat taajuusmuuttajia koskevat nykyiset ja tulevat verkkovaatimukset Euroopassa sekä suuritehoisten jännitevälipiirillisten taajuusmuuttajien tekniset ratkaisut. Diplomityössä tutkitaan myös monipulssimenetelmien vaikutuksia taajuusmuuttajan avulla verkkoon liitettävien generaattoreiden tehoon ja verkkovirran yliaaltoihin.

Työn tuloksena esitellään tulevat verkkomääräykset taajuusmuuttajakäyttöisille voimalaitoksille Euroopan alueella. Työssä vertaillaan myös suuritehoisten jännitevälipiirillisten keskijännitetaajuusmuuttajien tekniikkaa pienitehoisten pienjännitetaajuusmuuttajien tekniikkaan ja pohditaan keskijännitetekniikan etuja. Kolmannessa osiossa esitellään luodut fourierin yhtälöt kahteen eri monipulssijärjestelmään.

Lopuksi esitetään esimerkkejä taajuusmuuttajan käytön mahdollisista hyödyistä matalan putouksen vesivoimalaitoksessa.

Avainsanat: ENTSO-E, Grid code, Monipulssimenetelmä,
Keskijännitetaajuusmuuttaja

AALTO UNIVERSITY
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

ABSTRACT OF THE
MASTER'S THESIS

Author: Mikko Risku

Title: Network connection of high power frequency converter in power generation

Date: 16.4.2012

Language: Finnish

Number of pages: 8+87

Department of electrical engineering

Professorship: Power Systems and High Voltage Engineering

Code: S-18

Supervisor: Professor Matti Lehtonen

Instructor: M.Sc. Jouko Esko

Utilization of frequency converters is beginning to be beneficial in variety of high power applications. In this thesis employing frequency converters in megawatt-class power generation is studied. Present and future grid codes concerning frequency converters in Europe are examined. High power voltage source frequency converter technology is studied in this thesis. The effect of multi pulse methods on generator power and network current ripple are also examined.

Future grid code demands regarding frequency converters are presented in thesis. Technical differences of high power and low power voltage source frequency converters are also presented. The working principle of multi pulse methods is introduced and finally some application examples are given.

Keywords: ENTSO-E, Grid code, multi pulse method,
high voltage frequency converter

Esipuhe

Haluan kiittää työn ohjaajaa Jouko Eskoa ja työn valvojaa Professori Matti Lehtosta kannustavasta ohjauksesta. Lisäksi haluan kiittää Tohtori Tero Viitasta sekä Tohtori Jouko Niirasta ABB Drivesista heidän yhteistyöstään diplomityön tekemisen aikana.

16.4.2012

Mikko Risku

Sisältö

Esipuhe	4
Sisältö	5
Symbolit ja lyhenteet	7
1 Johdanto	9
2 Voimalaitoksen verkkovaatimukset	10
2.1 Nykyiset verkkovaatimukset Euroopassa	10
2.1.1 Sovellusalueet	10
2.1.2 Suomen ja Tanskan jännite- ja taajuusrajat	11
2.1.3 Saksan ja Espanjan jännite- ja taajuusvaatimukset	13
2.1.4 Yhdistyneen Kuningaskunnan ja Irlannin jännite- ja taajuusvaatimukset	15
2.1.5 Vaatimukset loistehon kulutukselle ja tuotannolle	16
2.1.6 Syvän jännitekuopan sietokyky	19
2.2 Taajuusmuuttajakäyttöjä koskevat nykyiset verkkovaatimukset	22
2.2.1 Jännitevaatimukset	22
2.2.2 Taajuusvaatimukset	23
2.2.3 Vaatimukset loistehon kulutukselle ja tuotannolle	24
2.2.4 Syvän jännitekuopan sietokyky	25
2.2.5 Harmoniset jännitteet ja virrat	26
2.3 ENTSO-E:n verkkokoodiluonnos	27
2.3.1 Jännite- ja taajuusrajat	28
2.3.2 Vaatimukset loistehon kulutukselle ja tuotannolle	30
2.3.3 Syvän jännitekuopan sietokyky	32
3 Taajuusmuuttajan verkkoliityntä	34
3.1 Diodeilla toteutettu verkkosuuntaaja	35
3.2 Tyristoreilla toteutettu verkkosuuntaaja	36
3.3 Verkkokommutoivan suuntaajan loisteho	38
3.4 Kaksitasoinen pulssinleveysmodulaatio	40
3.4.1 Jännitettä nostava tasasähkökatkoja	41
3.4.2 Yksivaiheiset pulssinleveysmoduloidut verkkosuuntaajat	43
3.4.3 Kolmivaiheiset pulssinleveysmoduloidut verkkosuuntaajat	48
3.5 Kolmitasoiset pulssinleveysmoduloidut verkkosuuntaajat	51

	6
4 Monipulssimenetelmät	58
4.1 12-pulssinen laitteisto	58
4.1.1 Dd- ja Yy-kytkettyjen muuntajahaarojen virtojen fourier-sarja	62
4.1.2 Dy-kytketyn muuntajahaaran virran fourier-sarja	65
4.1.3 12-pulssisen järjestelmän virran fourier-sarja	67
4.2 18-pulssinen laitteisto	69
4.2.1 +20° vaihesiirtävä muuntajahaara	70
4.2.2 +20° vaihesiirtävän muuntajahaaran virran fourier-sarja	73
4.2.3 -20° vaihesiirtävä muuntajahaara	77
4.2.4 -20° vaihesiirtävän muuntajahaaran virran fourier-sarja	78
4.2.5 18-pulssisen järjestelmän virran fourier-sarja ja yliaaltosisältö	82
4.3 Laitteiston käyttäminen yhden muuntajahaaran vikaantuessa	84
4.4 Kommutoinnin vaikutus verkkovirran yliaaltopitoisuuteen	85
5 Taajuusmuuttajan käyttö voimantuotannossa	88
5.1 Taajuusmuuttajalaitteisto	88
5.2 Kotelotyyppinen putkiturbiini	89
5.3 Kuilutyyppinen putkiturbiini	90
6 yhteenveto	92
Viitteet	93

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

P	Pätöteho
Q	Loisteho
S	Näennäisteho
T_s	Jaksonaika
t_{ON}	Kytkimen aika suljettuna
t_{OFF}	Kytkimen aika avattuna
f	Taajuus
f_{sw}	Kytkentätaajuus
ω	Kulmataajuus
I	Virran tehollisarvo
i	Virran hetkellisarvo
U, V	Jännitteen tehollisarvo
U_{di}	Välipiirin jännitteen keskiarvo
U_s, V_s	Vaihejännitteen tehollisarvo
u, v	Jännitteen hetkellisarvo
u_s, v_s	Vaihejännitteen hetkellisarvo
α	Kulma
μ	Kommutoimiskulma
γ	Kommutoimisvara
ψ	Napakulma
$\cos \phi$	Tehokerroin
L	Induktanssi
C	Kapasitanssi
N	Käämin kierrosluku
p	Napapariluku
$p.u.$	per unit -arvo

Alaindeksit

d	Taajuusmuuttajan välipiiriin liittyvä suure
o	Laitteesta ulos tulevan suureen alaindeksi
l	Suureen perusaalto, mikäli ei selvästi luetteloindeksi
L	Induktanssiin liittyvä suure
C	Kapasitanssiin liittyvä suure
v	Sähköverkkoon liittyvä suure

Operaattorit

Δt	Ajan muutos
ΔV	jännitteen muutos
$\frac{di}{dt}$	Virran derivaatta ajan suhteen
$\frac{du}{dt}$	Jännitteen derivaatta ajan suhteen
$\sum i$	Summa indeksin i yli

Lyhenteet

ABB	Asea Brown Boveri Ltd
AC	Vaihtovirta
ACER	Agency for the Cooperation of Energy Regulators
ARU	Active Rectifier Unit
CBU	Capacitor Bank Unit
CHP	Yhteistuotantolaitos
CSI	Current Source Inverter
DC	Tasavirta
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
EXU	Excitation Unit
IEC	International Electrotechnical Commission
INU	Inverter Unit
PWM	Pulssinleveysmodulaatio
SONI	System Operator Of Northern Ireland
THD	Total Harmonic Distortion
VSI	Voltage Source Inverter
4Q	4-kvadranttikäyttö

1 Johdanto

Taajuusmuuttajien käyttäminen on nykyään yleistä niin moottori- kuin generaattorikäyttöissäkin. Voimantuotannossa taajuusmuuttajia on totuttu näkemään tuulivoimaloissa, mutta taajuusmuuttajien käyttäminen alkaa olla kannattavaa yhä useammissa kohteissa ja yhä suuremmilla tehoilla. Kun generaattori on usean megawatin tehoinen, on järkevää käyttää pienjännitteisten laitteiden sijasta keskijännitteisiä laitteita, joilla ohjattavat tehot voivat olla jopa kymmeniä megawatteja. Suuritehoisissa keskijännitelaitteissa kannattaa monesti myös käyttää tekniikoita, jotka takaavat paremman sähkön laadun. Tässä diplomityössä tarkastellaan näitä tekniikoita sekä taajuusmuuttajien nykyistä käytettävyyttä kymmenien megawattien tehoisten voimantuotantolaitosten kannalta.

Tutkimuksen ensimmäisessä osassa tarkastellaan verkkovaatimuksia Euroopassa niin perinteisten tuotantolaitosten kuin taajuusmuuttajatekniikkaa käyttävien tuotantolaitostenkin kannalta. Tämä osio jakaantuu nykyisiin verkkovaatimuksiin sekä tulevaan eurooppalaisten kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö ENTSO-E:n (European Network of Transmission System Operators for Electricity) luomaan Euroopan alueen yhteiseen verkkokoodiin, josta käsitellään suuritehoisten taajuusmuuttajatekniikkaa käyttävien laitosten vaatimukset. Toisessa osassa perehdytään taajuusmuuttajatekniikkaan ja esitellään lukijalle erot yleisen pienjännitteisen taajuusmuuttajatekniikan ja keskijännitetaajuusmuuttajissa käytettävän tekniikan välillä. Kun generaattorin teho on kymmeniä megawatteja, taajuusmuuttajalaitteilla tuotettavan sähkön laatu tulee olla laadukasta, sillä suurten yliaaltovirtojen suodattaminen laskee laitteiston hyötysuhdetta. Suodattamisen tarvetta voidaan vähentää taajuusmuuttajassa käyttämällä pulssinleveysmodulaation lisäksi kolmitasoista jännitevälipiiriä, jolloin jännitteen ja virran särö ovat pieniä verrattuna kaksitasoista välipiiriä käyttäviin laitteisiin. Tutkimuksen kolmannessa osassa perehdytään monipulssimenetelmiin, joiden avulla saadaan taajuusmuuttajalaitteiston tehoa kasvatettua yhdistämällä monia taajuusmuuttajan siltoja rinnakkain. Kolmannessa osassa tutkitaan myös monipulssimenetelmien verkkovirran yliaaltoja vähentävää vaikutusta. Työn lopuksi pohditaan taajuusmuuttajatekniikan käytettävyyttä matalan putouskorkeuden vesivoimalaitoksissa sekä siitä mahdollisesti aiheutuvia hyötyjä ja haittoja.

2 Voimalaitoksen verkkovaatimukset

Energiantuotantolaitoksille on asetettu tiettyjä vaatimuksia, joiden tulee täyttyä verkkoliityntää suunniteltaessa. Verkko-operaattorit ovat luoneet verkkovaatimukset oman alueensa sähköjärjestelmälle sopivaksi ja varmistavat näin oman sähköverkkonsa luotettavuuden ja sähkön laadun. Monet verkko-operaattorit julkaisevat omat vähimmäisvaatimuksensa voimalaitoksien ominaisuuksille ja suorituskyvylle internetissä. Näin on tehty myös Suomen kantaverkko-operaattori Fingrid, joka on kohdentanut vaatimukset eri kokoisille ja -tyyppisille voimalaitoksille yhteistyössä pohjoismaisen synkronialueen muiden verkko-operaattoreiden kanssa. Tällä tavalla eri voimalaitoksista saadaan paras hyöty koko pohjoismaisen synkronialueen sähköjärjestelmän kannalta.

Tässä diplomityössä tehdään verkkokoodivertailu Euroopan eri maiden kesken sekä perinteisten että taajuusmuuttajatekniikkaa käyttävien tuotantomuotojen osalta, jotta saadaan kattava kuva eurooppalaisten verkkovaatimusten tilanteesta. Verkkokoodivertailun lisäksi työssä esitellään ENTSO-E:n alueelle luonnosteltu verkkokoodi, jota on tarkoitus soveltaa tulevaisuudessa kaikkiin verkkoon liitettäviin generaattoreihin.

2.1 Nykyiset verkkovaatimukset Euroopassa

Euroopan nykyisistä verkkokooodeista käsitellään Suomen, Espanjan, Saksan, Yhdistyneiden Kuningaskuntien, Irlannin ja Tanskan verkkokooodeja. Vertailu tehdään jännite-rajoiden, taajuusrajojen, verkkovikojen keston, loistehovaatimusten sekä sovellusalueen osalta. Näin saadaan luotua yleiskuva voimalaitosten nykyvaatimuksista Euroopan eri sähköverkoissa. Lopuksi vertaillaan erikseen taajuusmuuttajiin liittyviä verkkovaatimuksia.

2.1.1 Sovellusalueet

Tarkasteltavien verkkovaatimusten sovellusalueet vaihtelevat maittain, sillä eri maissa on erilaiset sähköverkot ja sähkön tuotantomuodot. Jotta eri maiden kesken pystytään tekemään vertailua, verkkovaatimusten sovellusalueet tulee olla tiedossa.

Taulukkoon 1 on koottu eri maiden verkkovaatimusten sovellusalueet. Kuten taulukosta nähdään, vaatimusten kohdentaminen on toteutettu joko tehon tai tuotantomuodon mukaan. Myös verkko, johon laitos kytkeytyy kohdentaa vaatimuksia joissain tapauksissa. Eri sovellusalueista voi huomata, että eri maissa on myös erilaiset tuotantomuodot vallitsevana.

Saksa on maana erikoistapaus, koska maassa operoi neljä verkko-operaattoria: EnBW Transportnetze AG, TenneT TSO GmbH (ent. E.ON), Amprion GmbH (ent. RWE) ja 50Hertz Transmission GmbH (ent. Vattenfall) [1]. Saksan kaikkia verkko-operaattoreita koskee entisen Saksan verkko-operaattoreiden yhdistyksen VDN:n (Verband Der Netzbetreiber) luoma TransmissionCode 2007, joka on sen aikaisten saksalaisten verkko-operaattoreiden yhteinen sopimus verkkoliityntöjen vähimmäisvaatimuksista. Jokaisella verkko-operaattorilla on lisäksi omat vaatimuksensa verkkoon liittyjille ja jokainen verkko-operaattori määrittelee sovellusalueen yhteiselle verkkosopimukselle. Esimerkiksi TenneT määrittelee verkkosääntöjen sovellusalueeksi kaikki yli 60 kV verkkoon liittyvät asiakkaat ja tuottajat[2]. Tanska on maan toinen erikoistapaus siksi, että maan kantaverkko on kytkeytynyt sekä Pohjoismaiden että Manner-Euroopan synkronialueisiin. Itä-Tanska on liittynyt Pohjoismaiden synkronialueeseen ja Länsi-Tanska Manner-Euroopan synkronialueeseen.

Taulukko 1. Eri maiden verkkovaatimusten sovellusalueet.

Fingrid (Suomi)	Espanja	Saksa	National Grid (Iso-Britannia)	SONI (Pohjois-Irlanti)	Eirgrid (Irlanti)	Tanska (Energinet.dk)
Synkronikäytössä olevat yli 10 MVA, 1...10 MVA suositus	Kaikki siirtoverkkoon liitettyt ja yli 10 MW jakeluverkkoon liitettyt synkronigeneraattorit	110, 220 ja 400 kV verkkoihin kytketyt Synkronigeneraattorit	Yli 50 MW, ei hajautettu tuotanto	Yhteistuotanto, höyryturbiinit ja kaasuturbiinit yli 5 MW	Yli 2 MW	Lämpövoimalaitokset yli 1,5 MW

Perusasioita tuotantolaitoksen verkkoon liittämisen kannalta ovat jännite- ja taajuusrajat. Kun verkon jännite ja taajuus pysyvät sovittujen rajojen sisällä, tuotantolaitoksen ei saa kytkeytyä irti verkosta. Seuraavaksi verrataan eri maiden jännite- ja taajuusrajoja keskenään.

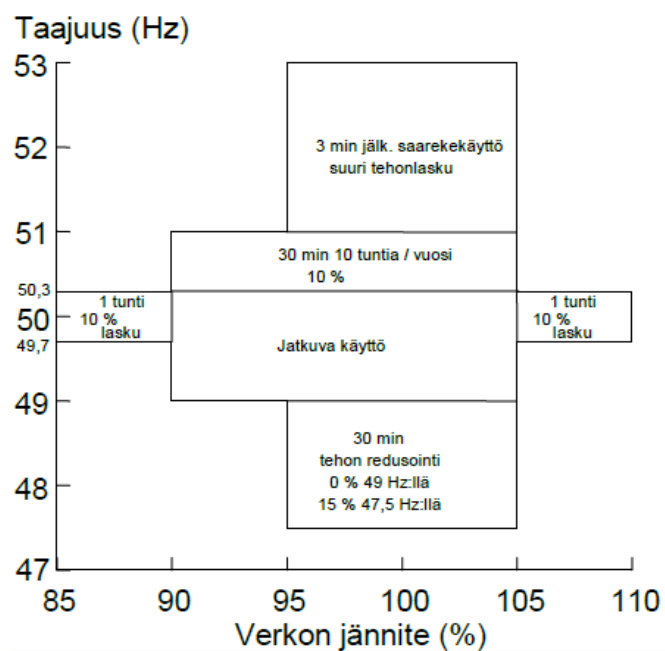
2.1.2 Suomen ja Tanskan jännite- ja taajuusrajat

Suomella ja Tanskalla on samantyylinen perusratkaisu jännite- ja taajuusrajoissa. Kummankin maan jännite-taajuuskuvassa on keskellä jatkuvan käytön alue, jolla toimissa laitoksen tulee tuottaa normaalisti tehoa verkkoon. Jännitteen noustessa tai laskiessa tämän alueen ulkopuolelle tullaan alueelle, jolla sallitaan tehon 10 % lasku ja jolla pitää pysyä yhden tunnin ajan verkkoon kytkettyneenä. Jos verkon jännite ei tunnin sisällä palaudu jatkuvalla alueelle, voimalaitos voidaan kytkeä irti verkosta. Tanskalla on lisävaatimuksena näiden alueiden ulkopuolella keskijänniteverkkoon kytketyn tuotannon jänniterajat.

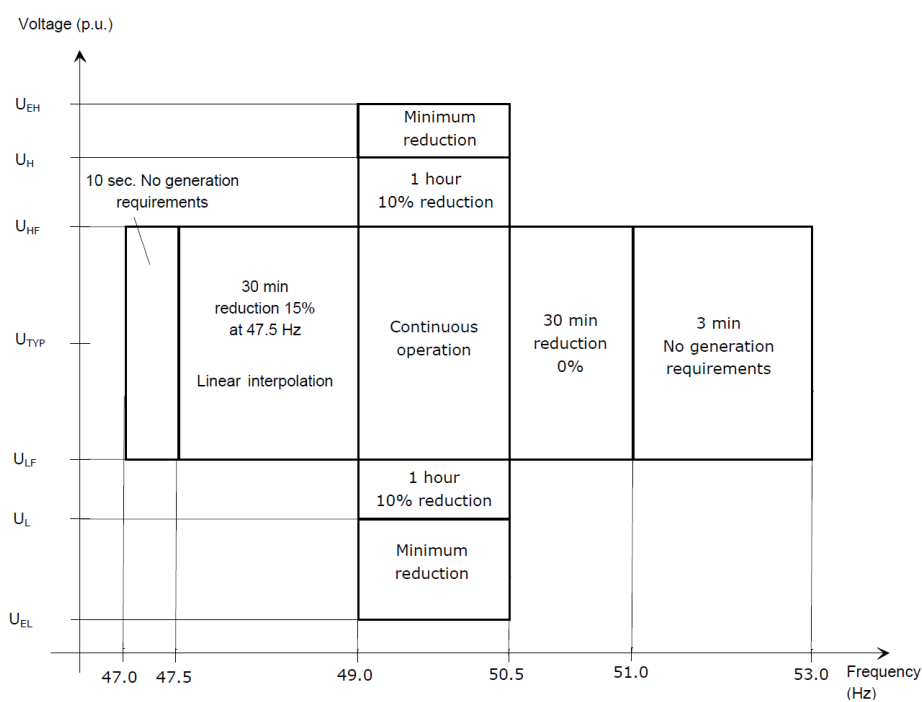
Jos taajuus laskee jatkuvan alueen alapuolelle - kummassakin vaatimuksessa alle 49 Hz - siirrytään alueelle, jolla laitoksen tuottama teho saa laskea lineaarisesti maksimissaan 15 % nimellistehosta, kun taajuus laskee 47,5 Hz saakka. Tämän taajuuden alapuolella Tanskalla on lisäksi vaatimuksena voimalaitokselle pysyä 10 sekuntia kytkettyneenä verkkoon, jos taajuus on yli 47 Hz. Taajuuden kasvaessa yli jatkuvan alueen rajojen kummassakin verkkovaatimuksessa on 30 minuutin aikaraja 51 Hz saakka. Tällä alueella Suomen vaatimuksissa sallitaan lisäksi 10 % tehonlasku. Taajuuden kasvaessa tätäkin suuremmaksi kummassakin verkkovaatimuksessa vaaditaan voimalaitoksen pysyvän kolme minuuttia kytkettyneenä verkkoon, kun taajuus pysyy alle 53 Hz. Tällä alueella Suomen verkkosäännöissä sallitaan suuri tehonlasku, mutta Tanskan verkkovaatimuksissa ei aseteta vaatimuksia tuotannolle. Tanskan verkkovaatimuksissa vaaditaan näiden taajuusrajojen ulkopuolella vähintään 300 millisekunnin verkossa pysyminen, jonka jälkeen voimalaitos saa irrottautua verkosta. [3] [4] Kuvissa 1 ja 2 on Suomen ja Tanskan jännite-taajuusvaatimukset. Näissä kuvissa on huomioitavaa se, että jatkuvan alueen ulkopuolella toimittaessa vain toisen kuvan suureista saa poiketa kerrallaan jatkuvalta alueelta. Muuten voimalaitos voi irrottautua verkosta. Taulukossa 2 on Tanskan verkkovaatimuksen jännite-taajuuskuvan jänniterajat jännitetasoin.

Kuvissa esitetyt taajuusrajat ovat jatkuvan tilan vaatimuksia. Taajuuden nopeista vaihteluista on myös esitetty vaatimuksia. Suomen verkkovaatimukset eivät salli tuotantolaitoksen irtikytketymistä verkosta taajuuden vaihdella. Tanskan verkkovaatimukset sen sijaan sallivat voimalaitoksen irtikytketymisen verkosta, jos taajuus muuttuu nopeammin kuin 2,5 Hz sekunnissa. Verkon taajuuden vaihtelun estämiseksi Suomen verkkoon kytketyn yli 50 MVA tehoisen sähkön tuotantolaitoksen jännitteensäätöön on

lisättävä taajuuden muutoksia tasoittava lisästabilointipiiri. Tanskan verkkoon liitettyyn voimalaitokseen tulee lisätä vastaava laitteisto, kun voimalaitoksen teho ylittää 25 MW. [3] [4]



Kuva 1. Suomen jännite- ja taajuusrajat. [3]



Kuva 2. Tanskan jännite- ja taajuusrajat. [4]

Taulukko 2. Ylempänä Tanskan verkkovaatimuksen jännite-taajuuskuvan jänniterajat jännitetasoin kilovoltteina ja alempana per unit -arvoina(p.u.). [4]

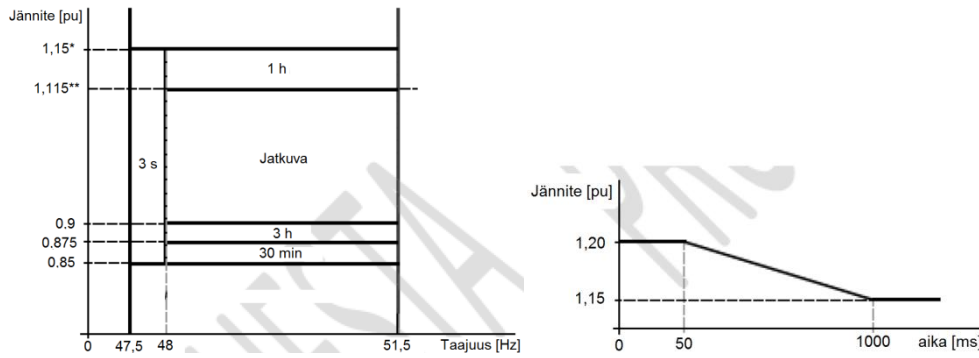
Nominal voltage U_n	Lower voltage U_L	Lower full-load voltage U_{LF}	Upper full-load voltage U_{HF}	Upper voltage U_H
[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
400	320	360	420	440
150	135	146	170	180
132	119	125	145	155
60	54	57	66	72.5
50	45	47.5	55	60.0

U_n [kV]	U_L [p.u.]	U_{LF} [p.u.]	U_{HF} [p.u.]	U_H [p.u.]
400	0,80	0,90	1,05	1,10
150	0,90	0,97	1,13	1,20
132	0,90	0,95	1,10	1,17
60	0,90	0,95	1,10	1,21
50	0,90	0,95	1,10	1,20

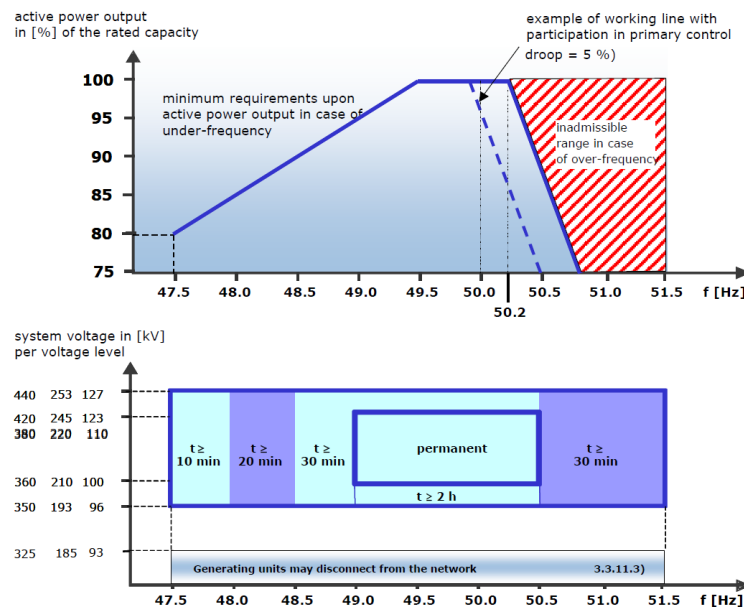
2.1.3 Saksan ja Espanjan jännite- ja taajuusvaatimukset

Saksalla ja Espanjalla on samantyylliset jännite- ja taajuusrajat keskenään ja niitä verrataan seuraavaksi kuten Suomen ja Tanskan vastaavia rajoja. Merkittävimpänä erona Suomen ja Tanskan verkkovaatimuksien vastaaviin rajoihin nähden Espanjan ja Saksan verkkovaatimukset vaativat laitoksen verkkoon kytkeytymisen kestävän samanaikaisesti sekä jännitteen että taajuuden ajautumisen pois jatkuvalta alueelta. Espanjan ja Saksan jännite- ja taajuusrajojen suurin keskinäinen ero taas on jatkuvan alueen taajuusrajat. Espanjan jännite- ja taajuusvaatimukset on esitetty kuvassa 3 ja Saksan vastaavat vaatimukset kuvassa 4. Kun Saksan jatkuvan alueen taajuuskaista on 49...50,5 Hz, Espanjalla vastaava alue on 48...51,5 Hz. Jatkuvan alueen jännitekaistat ovat kummassakin verkkovaatimuksessa lähes saman suuruiset pois lukien Espanjan lievennys 400 kV verkon osalta. Espanjalla on jännitteen takia irtikytkeytymisen rajoihin lisävaatimuksena ylijänniteaallon kestovaatimus. Voimalaitoksen tulee pysyä verkossa kiinni, vaikka irtikytkeytymisen jänniterajat ylittyisivätkin maksimissaan 1,2 p.u. suuruisen ylijänniteaallon takia. Vastaavasti alajännitteen takia irtikytkeytymisen rajoihin on tehty jännitekuopan kestovaatimus. Voimalaitos ei saa irrota verkosta, vaikka verkon jännite laskisi alle 0,85 p.u. maksimissaan yhden sekunnin ajaksi. [5] [6]

Saksan taajuusvaatimukseen on liitetty pätötehon tuottovaatimus. Sekä nimellistaajuusalueen alituksen ja ylityksen aikana sallitaan tehon lasku, mutta ylitaajuuksilla on myös pätötehon tuottorajoitus. Tämä tuottorajoitus on esitetty kuvassa 4 punaviivaisena alueena. Koska tehontuottokäyrä on minimituottovaatimus taajuuden suhteen, ylitaajuuksien tuotannon taajuudenseuranta täytyy tehdä tapauskohtaisesti, jotta vaatimus toteutuu. Esimerkki pääasiallisena taajuussäätäjänä toimivan voimalaitoksen toimintakäyrästä on esitetty katkoviivalla kuvassa 4 pätötehon tuottovaatimuksessa. Saksan verkkovaatimuksen jänniterajat on esitetty taulukossa 3 per unit -muodossa, jotta niitä pystytään vertaamaan paremmin Espanjan jänniterajoihin. [6]



Kuva 3. Vasemmalla Espanjan verkkovaatimusten jännite- ja taajuusrajat, oikealla kes-
tettävän ylijänniteaallon profiili. Tähdellä merkityt kohdat liittyvät 400 kV jänniterajo-
jen lievennykseen, jossa ylimpänä rajana käytetään arvoa 440 kV per unit -arvon 1,15
sijasta sekä arvoa 435 kV per unit -arvon 1,115 sijasta. Muokattu lähteestä [5]



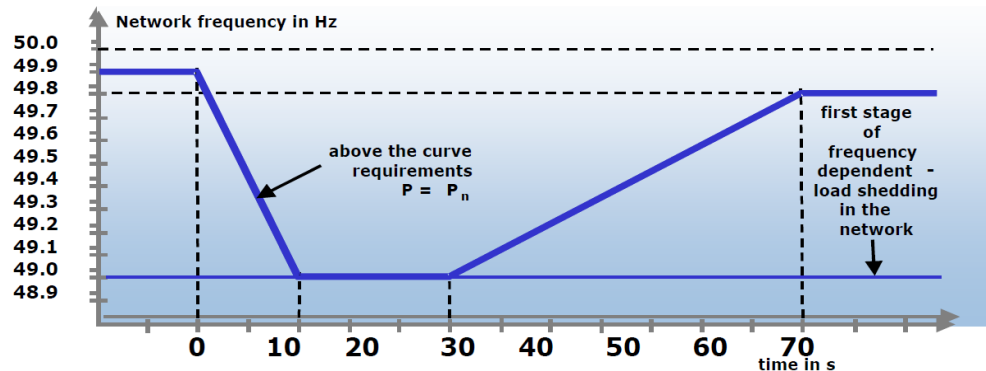
Kuva 4. Saksan jännite- ja taajuusrajat sekä taajuuteen sidottu pätöteho vaatimus. [6]

Taulukko 3. Saksan verkkovaatimuksen jänniterajat kilovoltteina sekä per unit -arvoina.

[kV]	[p.u.]	[kV]	[p.u.]	[kV]	[p.u.]
440	1,16	253	1,15	127	1,15
420	1,11	245	1,11	123	1,12
380	1,00	220	1,00	110	1,00
360	0,95	210	0,95	100	0,91
350	0,92	193	0,88	96	0,87
325	0,86	185	0,84	93	0,85

Taajuuden dynaamisten vaihteluiden sietokyky on Saksan verkkovaatimuksissa si-
dottu aikaan. Voimalaitoksen tulee pystyä tuottamaan nimellistehon kuvaan 5 piirretyn
käyrän yläpuolella. Espanjan verkkovaatimuksissa on määrätty, että voimalaitoksen
tulee pysyä kytkeytyneenä enintään 2 Hz/s taajuuden muutoksissa eikä voimalaitoksen
laitteiston saa rajoittaa tahtigeneraattorin luontaista kykyä tasoittaa taajuudenvaihteluita.

Espanjassa vaaditaan lisäksi taajuuden muutoksia tasoittava lisästabilointiipiiri, kun laitoksen teho ylittää 250 MW. Saksassa vastaavan laitteiston asentamista koskeva vaatimus on voimalaitoskohtainen eikä verkkovaatimuksissa aseteta sille ehtoja, vaikkakin Saksassa vaaditaan yli 100 MW tehoisilta laitoksilta ensisijaista tehonsäätöä. Lisäksi alle 100 MW tehoisien laitoksen kohdalla vaatimukset todennetaan tapauskohtaisesti. [5] [6]



Kuva 5. Saksan pätötehon tuottovaatimus taajuuden aleneman keston mukaan. [6]

2.1.4 Yhdistyneen Kuningaskunnan ja Irlannin jännite- ja taajuusvaatimukset

Yhdistyneen Kuningaskunnan ja Irlannin verkkoja hallitsee viisi verkko-operaattoria. Ison-Britannian saarella toimivat Englannin ja Walesin alueella kantaverkkoyhtiö National Grid ja Skotlannin alueella Scottish and Southern Energy plc sekä Scottish Power Transmission plc. Kantaverkkoyhtiö EirGrid hallinnoi Irlannin saaren kantaverkkoa lukuun ottamatta System Operator Of Northern Irelandin (SONI) hallinnoimaa Pohjois-Irlannin verkkoa. [1] National Gridillä on lisäksi operatiivinen vastuu Ison-Britannian saaren siirtoverkosta[7].

Britteinsaarten verkkovaatimusten jännite- ja taajuusrajat ovat puettu hieman eri muotoon kuin Pohjoismaiden ja Manner-Euroopan vastaavat rajat. Jänniterajat on kerrottu tekstillä, eikä jänniterajojen sisälle ole rakennettu tehon tuottamisvaatimuksia. National Grid, SONI ja EirGrid ilmoittavat normaaleiksi jännitteen vaihteluiksi taulukoon 4 kirjatut vaihteluvälit. Ainoastaan EirGrid ilmoittaa normaalin jännitteen vaihteluvälin lisäksi poikkeukselliset jännitteen vaihteluvälit, mutta yhdenkään verkko-operaattorin verkkovaatimuksissa ei suoraan kerrota, mitä tulee tapahtua, jos jännite ajautuu ulos normaalilta vaihteluväliltä. [8] [9] [10]

Kaikki kolme verkko-operaattoria vaativat voimalaitoksilta nimellistuotantoa taajuusalueella 49,5...50,5 Hz. EirGrid vaatii lisäksi laitokselta kykyä toimia jatkuvasti minimituotannolla taajuusalueella 49,8...51 Hz. Minimituotanto on pienin mahdollinen teho, minkä voimalaitos pystyy jatkuvasti tuottaa ja se on määritelty jokaiselle voimalaitokselle[9]. National Gridillä on pätötehon tuottamisen vähimmäisvaatimus taajuuksilla 47...49,5 Hz siten, että 49,5 Hz kohdalla voimalaitoksen tulee pystyä toimimaan nimellisteholla ja kun taajuus laskee, myös tehovaatimus laskee lineaarisesti, kunnes 47 Hz kohdalla pätötehon tuotto tulee olla vähintään 95 % nimellistehosta. EirGridin ja National Gridin verkot yhdistyvät toisiinsa SONI:n verkon kautta. Tästä saattaa johtua SONI:n vaikeammin täytettävät taajuusvaatimukset, joissa ei välillä 47...52 Hz ole aikamääreitä, vaan voimalaitoksen tulee pysyä kytkeytyneenä verkossa tuolla normaalilla vaihteluvälillä jatkuvasti. SONI:n ja EirGridin verkkovaatimuksissa sallitaan voimalaitoksen irtikytkeytyminen, jos taajuuden vaihtelunopeus ylittää 0,5 Hz sekunnissa. Taa-

juuden lisästabiloitintipiiristä ei näillä operaattoreilla ole vaatimuksia. National Gridillä taas taajuuden lisästabiloitintipiiristä sovitaan erikseen, mutta taajuuden dynaamisten vaihteluiden vuoksi voimalaitoksen ei saa irtikytkeytyä verkosta. Näiden kolmen verkko-operaattorin verkkovaatimukset taajuuden osalta on esitetty taulukossa 5. [8] [9] [10]

Koska Britteinsaarten verkkokoodeissa jännite- ja taajuusrajat eivät ole toisistaan riippuvaisia, ne ovat vaativampia kuin Suomen ja Tanskan verkkokoodien rajat. Verkkovaatimukset ovat tältä osin vaativampia myös Manner-Euroopassa verrattuna Pohjoismaihin.

Taulukko 4. National Gridin, SONIn ja EirGridin verkkovaatimukset verkon jännitevaihteluiden osalta. National Gridin kohdalla tähdellä merkityt arvot ovat arvoja, jotka esiintyvät normaaleissa tilanteissa vain 15 minuuttia kerrallaan. EirGridin kohdalla sulkeihin merkityt arvot ovat poikkeuksellisen tilan arvoja.

Jännitetaso [kV]	National Grid		SONI		EirGrid	
	[kV]	[p.u.]	[kV]	[p.u.]	[kV]	[p.u.]
400	420(440)*	1,05(1,1)*			410(420)	1,03(1,05)
	380(360)*	0,95(0,9)*			370(350)	0,93(0,88)
275	302,5	1,1	302,5	1,1		
	247,5	0,9	247,5	0,9		
220					240(245)	1,09(1,11)
					210(200)	0,95(0,91)
132	145,2	1,1				
	118,8	0,9				
110			121	1,1	120(123)	1,09(1,12)
			99	0,9	105(99)	0,95(0,9)

Taulukko 5. National Gridin, SONIn ja EirGridin verkkovaatimukset verkon taajuusvaihteluiden osalta.

National Grid			SONI		EirGrid	
51,5...52 Hz	15 min		50,5...52 Hz	Jatkuva	50,5...52 Hz	60 min
51...51,5 Hz	90 min				49,8... 51 Hz	Jatkuva, minimi- tuotanto
50,5...51 Hz	Jatkuva				49,5...50,5 Hz	Nimellistuotanto
49,5...50,5 Hz	Nimellisteho		49,5...50,5 Hz	Nimellisteho	49,5...50,5 Hz	Nimellistuotanto
49...49,5 Hz	Lineaarinen tehon lasku 5 %	Jatkuva	47...49,5 Hz	Jatkuva, teho saa laskea sopivassa suhteessa	47,5...49,5 Hz	60 min
47,5...49 Hz		90 min			47...47,5 Hz	20 s
47...47,5 Hz		20 s				

2.1.5 Vaatimukset loistehon kulutukselle ja tuotannolle

Yksinkertaisimmat loistehovaatimukset ovat Yhdistyneen kuningaskunnan verkko-operaattoreilla. National Gridin ja SONIn verkkovaatimuksissa ei ole teho- eikä jännite-rajaja, vaan niissä on ilmoitettu pelkästään magnetoinnin toiminta-alue, jossa voimalaitoksen tulee pystyä toimimaan. Fingridin verkkovaatimuksissa tarkennetaan loistehovaatimuksia jännitteen arvoilla. Lisäksi Suomen verkkovaatimuksissa vaaditaan voimalaitokselta toimintaa nimellisellä pätötehollaan loistehorajojen sisäpuolella toimittaessa.

Näiden kolmen verkko-operaattorin voimalaitoksen tehokertoimelle vaaditut toiminta-alueen on esitetty taulukossa 6. Yhdistyneen kuningaskunnan verkko-operaattoreiden loistehovaatimuksiin ei liity pätötehorajaa, joten loistehon tuotanto- ja kulutusrajat ovat tässä mielessä helpommat täyttää. Toisaalta näiden verkko-operaattoreiden loistehorajoissa ei ole jännitetarkennusta, joten voimalaitoksen täytyy pystyä toimimaan näillä tehokertoimen arvoilla, kun jännite on sallittujen rajojen sisäpuolella. Lisäksi nämä operaattorit vaativat laajemmalla tehokertoimen alueella toimimista, kuin Fingrid. [3] [8] [10]

Taulukko 6. Suomen ja Yhdistyneen Kuningaskunnan verkko-operaattoreiden loisteho-ohjeet voimalaitoksille.

	Tehokerroin
Fingrid	1...0,9(ylimagnetoitu), kun U=90-105%, P=100%
	1...0,95(alimagnetoitu), kun U=100-105%, P=100%
National Grid	0,85(ylimagnetoitu)...0,95(alimagnetoitu)
SONI	0,8(ylimagnetoitu)...0,95(alimagnetoitu)

EirGridin loisteho-ohjeet ovat jo hieman monimutkaisemmat, kuin Suomen ja Yhdistyneen Kuningaskunnan. Sen loistehorajat on asetettu usealle jännitealueelle sekä erikseen täydelle teholla ja osateholla. EirGridin Jännitealueet on jaettu kahteen osaan: Verkon poikkeuksellisen tilan jännitealueeseen, joka on esitetty taulukossa 4, sekä erikseen ilmoitettuun alempaan jännitealueeseen. 400 kV verkon jännitealue poikkeaa tästä säännöstä, sillä erikseen ilmoitettu alempi jännitealue kuuluu tässä tapauksessa poikkeuksellisen tilan jännitealueeseen, joten loistehorajojen kohdalla 400 kV poikkeuksellisen tilan jännitealueen alaraja on 360 kV. EirGridin loistehovaatimus on esitetty taulukossa 7 ja erikseen ilmoitetut alemmat jännitealueet taulukossa 8. Nimellisen tehon ja osatehon välillä voimalaitoksen tulee tuotantopuolella toimittaessa pystyä tuottamaan loistehoa vähintään niin paljon, kuin noiden kahden pisteen väliin piirretty suora rajaa. Vastaavasti kulutuspuolella toimittaessa voimalaitoksen tulee pystyä kuluttamaan loistehoa vähintään suoran määräämän arvon verran. [9]

Näissä loistehovaatimuksissa on huomionarvoinen seikka koskien voimalaitoksen jänniterajoja. Vaikka verkkovaatimuksissa kerrotaan verkon poikkeuksellisen tilan jännitealueet, joiden sisällä voimalaitoksen pitää pystyä toimimaan, loistehovaatimuksessa vaaditaan loistehon tuotantoa vieläkin pienemmillä jännitteillä. Tästä voinee tulkita, etteivät verkkovaatimuksissa annettujen jänniterajojen ulkopuolella toimiminen tarkoita sitä, että voimalaitoksen olisi sallittua irrottautua verkosta välittömästi.

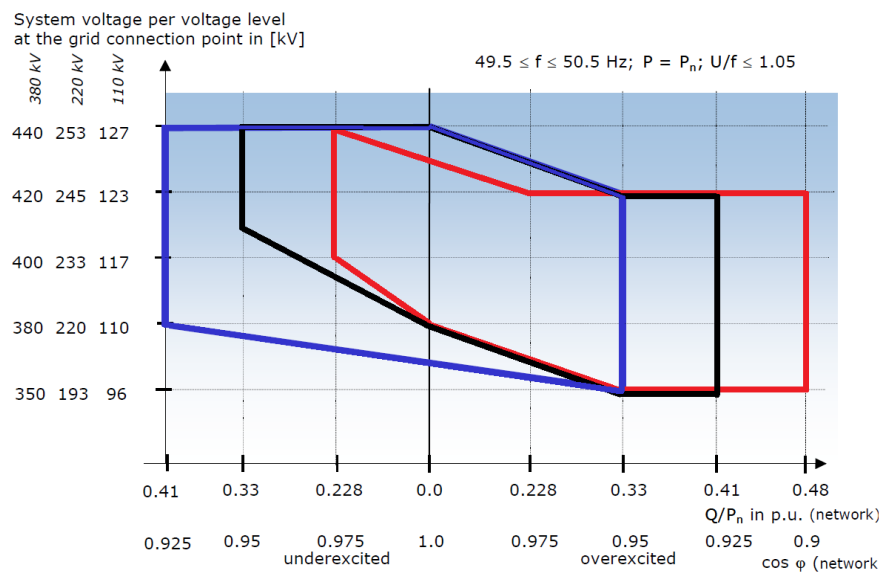
Taulukko 7. EirGridin loistehovaatimukset. Tähdellä merkityssä alueessa on poikkeus 400 kV verkossa.

Jännitealueet	Tehokerroin	
	Nimellisteholla	35 % teholla
Poikkeuksellisen tilan jännitealue*	0,93(alimagnetoitu)... 0,85(ylimagnetoitu)	0,7(alimagnetoitu)... 0,4(ylimagnetoitu)
Alempi jännitealue	1... 0,85(ylimagnetoitu)	0,7(alimagnetoitu)... 0,4(ylimagnetoitu)

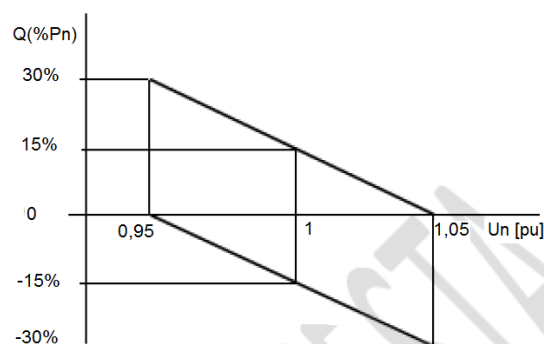
Taulukko 8. EirGridin loistehovaatimuksissa käytetyt alemmat jänniterajat.

	400 kV	220 kV	110 kV
Alempi jännitealue	350...360 kV	190...200 kV	85...99 kV

Saksan, Espanjan ja Tanskan verkkovaatimuksissa loistehon tuotantoalue on ilmaistu selkeästi kuvin. Saksalla on loistehon tuottamisen osalta kolme eri loistehoaluetta, joista verkko-operaattori määrää voimalaitokselle yhden. Loistehon tuotto- ja kulusvaatimus voi ulottua esimerkiksi tehokertoimen arvosta 0,925(alimagnetoitu) arvoon 0,95(ylimagnetoitu), kuten kuvassa 6 on esitetty sinisellä viivalla. Saksan eri verkkojen osat ovat siis vaihtelevan luonteisia loistehon tuotannon osalta. Espanjalla on ilmoitettu loistehorajat prosentteina pätötehosta verkon jännitteen vaihteluvälillä 0,95 p.u. - 1,05 p.u. Tällä välillä suurimman tuotetun tai kulutetun loistehon määrä on 30 % voimalaitoksen nimellisestä pätötehosta. Voimalaitoksen ei kuitenkaan tarvitse pystyä tuottamaan tuota loistehomäärää koko jännitteen vaihteluvälillä, vaan lievennetysti kuten kuvassa 7 on esitetty. [5] [6]

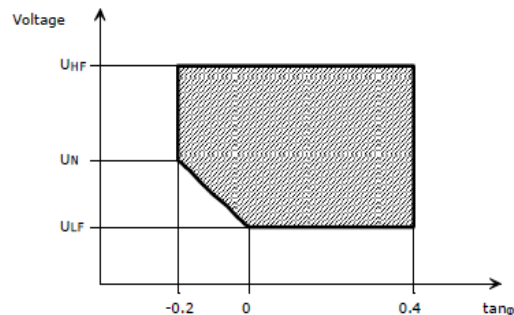


Kuva 6. Saksan verkkovaatimusten kolme eri loistehon kulutus- ja tuotantoaluetta. Muokattu lähteestä [6]



Kuva 7. Espanjan loistehovaatimukset. [5]

Energinet.dk:n loistehorajat on ilmoitettu jänniterajojen U_{HF} ja U_{LF} avulla, jotka on esitetty jännitetasoittain taulukossa 2. Voimalaitoksen täytyy pystyä toimimaan välillä $\tan\phi = -0,2 \dots 0,4$, joka vastaa kahden desimaalin tarkkuudella tehokertoimen $\cos\phi$ aluetta $0,98(\text{alimagnetoitu}) \dots 0,93(\text{ylimagnetoitu})$. Normaalilla suuremmilla jännitteillä ei loistehoa tarvitse tuottaa niin paljon kuin normaalia pienemmillä jännitteillä. Tanskan loistehon tuotanto- ja kulutusvaatimus on esitetty kuvassa 8. [4]



Kuva 8. Energinet.dk:n vaatimus loistehon kulutuksen ja tuotannon osalta. [4]

2.1.6 Syvän jännitekuopan sietokyky

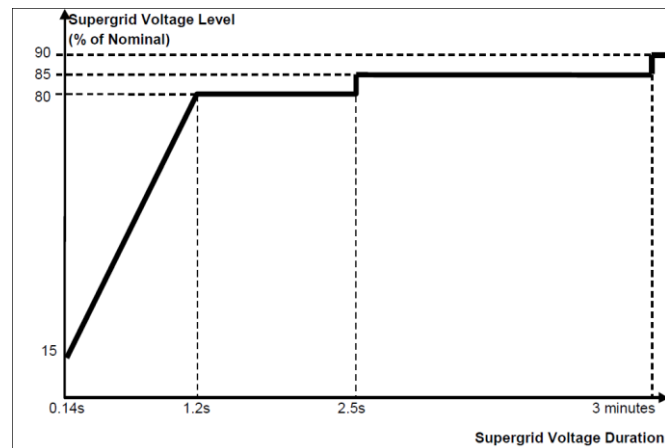
Irlannin saaren verkko-operaattoreilla ja Espanjalla ei ole erikseen määriteltynä syvän jännitekuopan sietokykyä. Espanjalla ei ole synkronigeneraattoreille yleisiä vaatimuksia verkossa esiintyvien oikosulkuvikojen siedosta lainkaan, joten oletetaan, että nämä asiat käsitellään Espanjassa tapauskohtaisesti.

Irlannin saaren verkko-operaattorit määrittelevät verkon oikosulkuvikojen sietokyvyn pelkästään verkon vika-ajan perusteella. Taulukossa 9 on SONIn ja EirGridin verkkojen vika-ajat jännitetasoittain. Voimalaitoksen ei tule irrottautua verkosta vika-ajan ollessa lyhempi, kuin taulukossa ilmoitetut arvot.

Taulukko 9. SONIn ja EirGridin verkkojen vika-ajat jännitetasoittain.

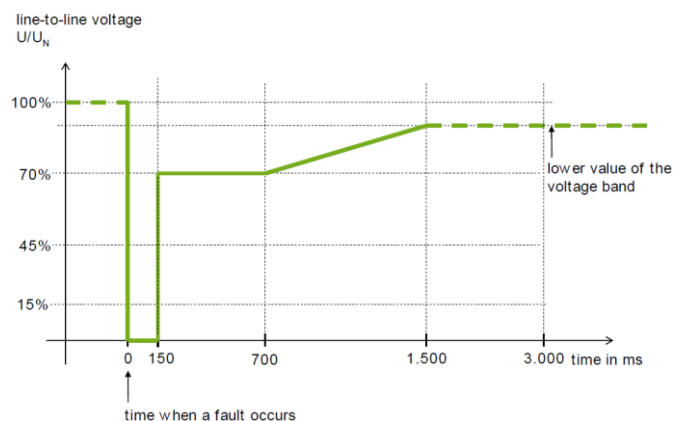
	SONI	Eirgrid
400 kV		80 ms
275 kV	100 ms	
220 kV		100 ms
132 kV		
110 kV	120 ms	120 ms

National Gridillä on Britteinsaarten verkko-operaattoreista ainoana graafinen jännitekuopan sietoprofiili voimalaitoksille. Voimalaitoksen tulee pysyä kytkeytyneenä verkkoon, vaikka jännite on nollassa 140 ms. Tämän jälkeen voimalaitoksen tulee pysyä kytkeytyneenä, jos verkon toimintapiste on kuvassa 9 esitetyn mustan viivan yläpuolella. National Gridin syvän jännitekuopan sietovaatimukseen ei liity tehon tuotantovaatimusta. [10]



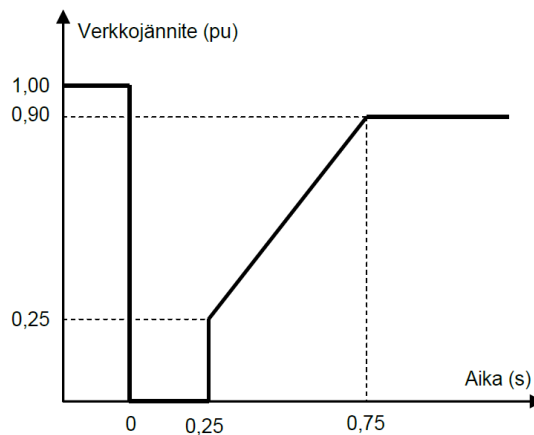
Kuva 9. National Gridin syvän jännitekuopan sietoprofiili voimalaitoksille. [10]

Saksan verkko-operaattori TenneT:n alueella voimalaitoksen synkronigeneraattori ei saa kytkeytyä irti verkosta, vaikka verkon jännite olisi nollassa 150 ms. Tämän jälkeen generaattori saa irrottautua verkosta, jos jännite on pienempi kuin 70 % nimellisestä 550 ms ajan. Saksan verkko-operaattori TenneT:n vaatimus syvän jännitekuopan sietämiseen synkronigeneraattoreille on esitetty kuvassa 10. Generaattorin täytyy pysyä verkkoon kytkeytyneenä, jos verkon toimintapiste on kuviin piirretyn viivan yläpuolella. TenneT:n syvän jännitekuopan vaatimus pätee jännitteeltään vähintään 60 kV verkkojen liityntäpisteissä. [2]



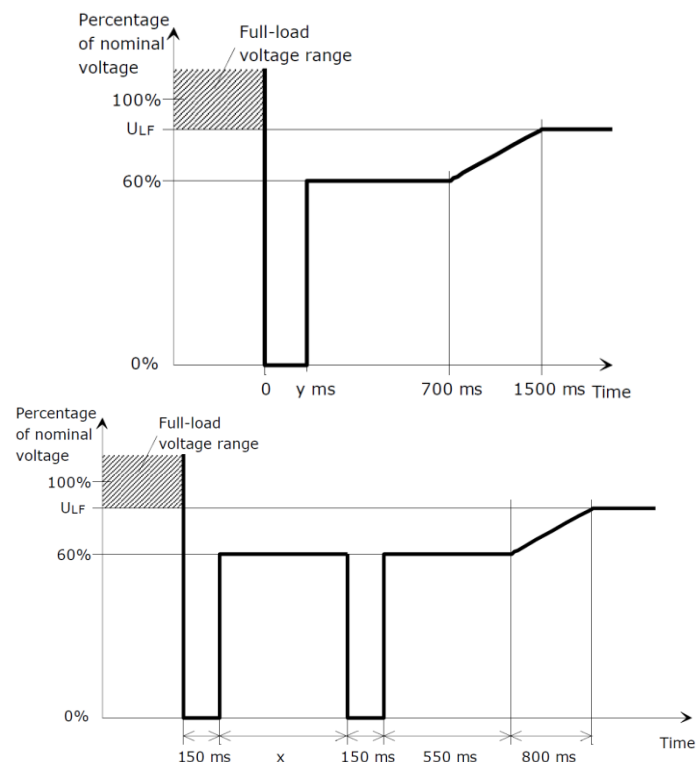
Kuva 10. TenneT:n vaatimus syvän jännitekuopan sietämiselle synkronigeneraattoreilla. [2]

Fingridin syvän jännitekuopan sietovaatimus on nollajännitteen osalta vaativampi kuin Saksan vastaava vaatimus. Voimalaitoksen täytyy pysyä verkkoon kytkeytyneenä Suomen verkossa, mikäli vian aikainen jännite on nollassa enintään 250 ms. Fingridin syvän jännitekuopan vaatimus on esitetty kuvassa 11. Vaatimusta on lisäksi tarkennettu siten, että vian aikana sallitaan ainoastaan pieni tehon lasku. Syvän jännitekuopan sietovaatimus koskee Fingridin 110 kV, 220 kV tai 400 kV verkkoon liitettymiä voimalaitoksia, mutta myös alempaan jännitteeseen kytkettyjen voimalaitosten pitää kyetä kestämään vastaava jännitekuoppa lähimmässä Fingridin sähköverkon liityntäpisteessä. [3]



Kuva 11. Fingridin syvän jännitekuopan sietovaatimus. [3]

Energinet.dk:n verkkovaatimus poikkeaa joukosta syvän jännitekuopan tapauksessa, sillä joukosta ainoana Energinet.dk:n vaatimuksiin sisältyy toistuvan syvän jännitekuopan sietovaatimus. Sen vaatimukset poikkeavat muista myös siltä osin, että maan alueella on kaksi eri syvän jännitekuopan profiilia. Tämä johtuu siitä, että Pohjoismaiden synkronialueella käytetään 250 ms jännitteen nolla-aikaa, kun Manner-Euroopassa käytetään jännitteen nolla-ajalle arvoa 150 ms. Tanskassa syvän jännitekuopan jännitteen nolla-aikana käytetään arvoa 250 ms Itä-Tanskassa, joka on Pohjoismaiden synkronialueessa ja arvoa 150 ms Länsi-Tanskassa, joka on Manner-Euroopan synkronialueessa. Tanskan syvän jännitekuopan vaatimus on esitetty kuvassa 12. Kuvassa esitetty jännitteen nolla-ajan arvo y on edellä mainittu 150 ms tai 250 ms riippuen synkronialueesta ja toistuvan jännitekuopan vaatimuksessa jännitteen nolla-arvojen välisenä aikana x käytetään arvoa väliltä 300 ms...800 ms. Vian aikana sallitaan ainoastaan 10 % tehon lasku. Tanskan syvän jännitekuopan vaatimus koskee jännitteeltään yli 100 kV verkkoihin kytkettyjä voimalaitoksia. [4]



Kuva 12. Energinet.dk:n vaatimus syvän jännitekuopan sietokyvyille. [4]

2.2 Taajuusmuuttajakäyttöä koskevat nykyiset verkkovaatimukset

Osa vertailuryhmän verkko-operaattoreista on luonut vaatimukset erikseen tahtigeneraattoreille ja kaikille muille generaattoreille. Tässä osiossa tarkastellaan näitä kyseisiä muille generaattorityypeille asetettuja vaatimuksia niiltä osin, kun tietoja on saatavilla. Osalla vertailuryhmän verkko-operaattoreista taas on omissa verkkovaatimuksissaan määritelty säännöt erikseen synkronigeneraattoreille ja tuulivoimaloille. Koska taajuusmuuttajatekniikan käyttö on nykyisten tuulivoimaloiden yhteydessä yleistä, sisällytetään suuritehoisten tuulivoimaloiden verkkovaatimukset vertailuun niiden maiden osalta, jotka nämä erikseen määrittelevät.

Suomen, Tanskan ja Irlannin saaren verkko-operaattoreilla on luotu verkkosääntöihin lisäosat tuulivoimaloita varten. Suomen osalta tarkastellaan vaatimuksia tuulivoimaloille, joiden nimellisteho on yli 10 MVA. Tanskan vaatimuksista käsitellään yli 25 MW tehoisia tuulivoimaloita ja yli 25 kW voimaloita niiltä osin, kun vaatimukset pätevät myös yli 25 MW voimaloihin. Irlannin saaren lisävaatimukset koskevat ohjattavia tuulivoimalaitoksia. SONIn vaatimuksista käsitellään yli 10 MW tehoisia tuulivoimaloita.

Espanjalla ja Ison-Britannian verkko-operaattorilla National Gridillä on lisävaatimukset ilmaistu muille, kuin tahtigeneraattoreille. National Gridin osalta käsitellään maalle asennettuja voimalaitoksia. Saksan verkkovaatimuksissa on asia esitetty uusiutuviin energiamuotoihin perustuvilla tuotantomuodoilla, mutta sen kerrotaan kuitenkin tarkoittavan periaatteessa muita, kuin tahtigeneraattoreita. Tästä eteenpäin tässä työssä esiintyvä viittaus "ei-synkroninen tuotantomuoto" viittaa Espanjan ja Ison-Britannian verkko-operaattoreiden kohdalla näihin tuotantomuotoihin ja Suomen, Tanskan ja Irlannin saaren verkko-operaattoreiden kohdalla edellä kuvattuun tuulivoimaan.

2.2.1 Jännitevaatimukset

Jännitevaatimukset ei-synkronisille tuotantomuodoille Suomessa, Britteinisaarilla ja Espanjassa ovat kunkin verkko-operaattorin tapauksessa samat kuin niiden vaatimukset tahtigeneraattoreille. Tanskan jännitevaatimukset tuulivoimalaitoksille ovat 50...100 kV verkoille samat, kuin lämpövoimalaitoksille. Kuitenkin Tanskassa yli 100 kV verkkoihin liitettyjen tuulivoimalaitosten jännitevaatimukset poikkeavat lämpövoimalaitosten vaatimuksista siten, että jännitteen yläraja on asetettu jännitteeseen, joka vastaa täyden tehon yläjännitevaatimusta lämpövoimalaitoksilla. Nämä jännitealueet on listattu taulukossa 2 jännitteinä U_L ja U_{HF} . [11]

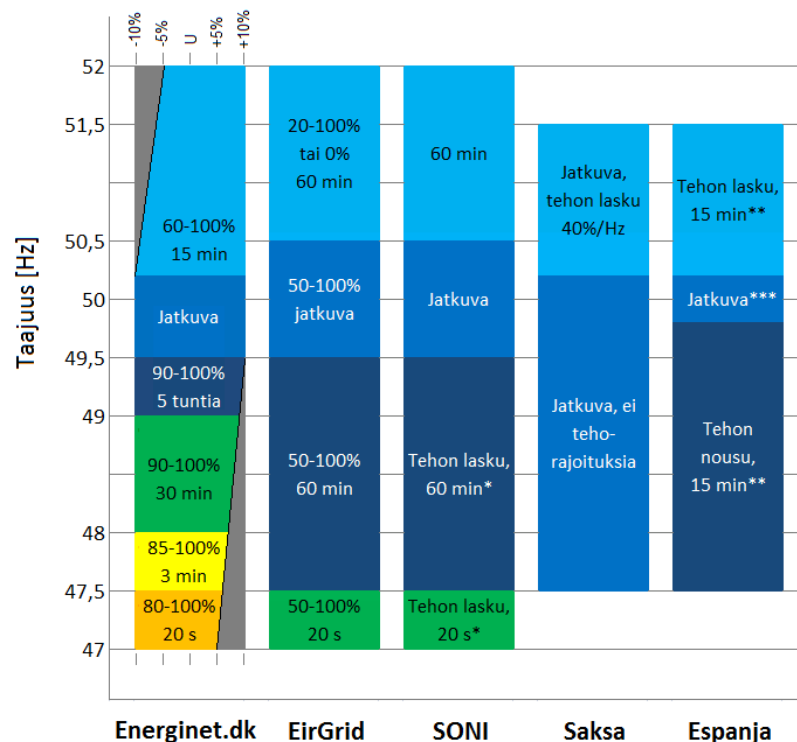
Saksassa ei-synkronisien tuotantomuotojen lisäjännitevaatimukset on ilmaistu siten, että voimalaitoksen tulee irrottautua verkosta tietyn ajan kuluttua, mikäli jännite poikkeaa normaalista. Jos siirtoverkon liittymispisteessä jännite laskee alle 85 % nimellisarvostaan ja liittymispisteessä kulutetaan loistehoa, voimalaitoksen tulee irrottautua verkosta 0,5 sekunnin kuluttua. Jos taas jännite generaattorimuuntajan alajännitepuolella laskee arvoon 80 % generaattorin jännitetasolle asetetun jännitteen alarajasta, tulee neljännes generaattoreista saman muuntajan takana irrottautua verkosta siten, että ensimmäinen neljännes kytkeytyy irti 1,5 s kuluttua, toinen 1,8 s kuluttua, kolmas 2,1 s kuluttua ja niin edelleen. Jos vastaava jännite ylittää arvon 120 % generaattorin jännitetasolle asetetun jännitteen ylärajasta, kyseisen muuntajan takana oleva generaattori tulee kytkeytyä irti verkosta 100 ms kuluttua. [6]

2.2.2 Taajuusvaatimukset

Fingridin ja National Gridin taajuusvaatimukset ei-synkronisille tuotantomuodoille vastaavat niiden asettamia tahtigeneraattoreiden taajuusvaatimuksia. [3] [10] Muiden tässä työssä käsiteltyjen maiden verkko-operaattoreilla on sen sijaan lisävaatimuksia taajuuksia kohtaan, kun on kyse ei-synkronisista tuotantomuodoista. Ne liittyvät pätötehon hallintaan ja siihen, kauanko voimalaitoksen tulee pysyä kytkeytyneenä verkkoon taajuuden vaihdellessa. Eri verkko-operaattoreiden vaatimukset on esitetty kuvassa 13. SONIn vaatimuksessa tehon laskua on tarkennettu sanoin "teho saa laskea sopivassa suhteessa", kuten taulukossa 5.[8] Kohdat, joihin tämä pätee, on merkitty kuvaan 13 tähdellä. Espanjan taajuusvaatimukseen liittyy ylätaajuuksilla lineaarinen pätötehon lasku ja alataajuuksilla lineaarinen pätötehon nousu kaavan 1 mukaan.

$$[5] K = - \frac{\Delta P / M_{base}}{\Delta f / f_{base}} \quad (1),$$

missä $\Delta P / M_{base}$ on pätötehon muutos suhteessa nimellistehoon, $\Delta f / f_{base}$ on taajuuden muutos suhteessa perustaajuuteen (50 Hz) ja K on vakio, jonka tulee olla säädettävissä välillä 15...50. Kohdat, joihin tämä tehon nousu ja lasku pätee, on merkitty kuvaan 13 kahdella tähdellä. Espanjan vaatimuksessa tulee lisäksi pystyä säätämään jatkuvaa aluetta tulee välillä $\pm 10 \dots \pm 200$ mHz. Tämä on merkitty kuvaan 13 kolmella tähdellä. [5]



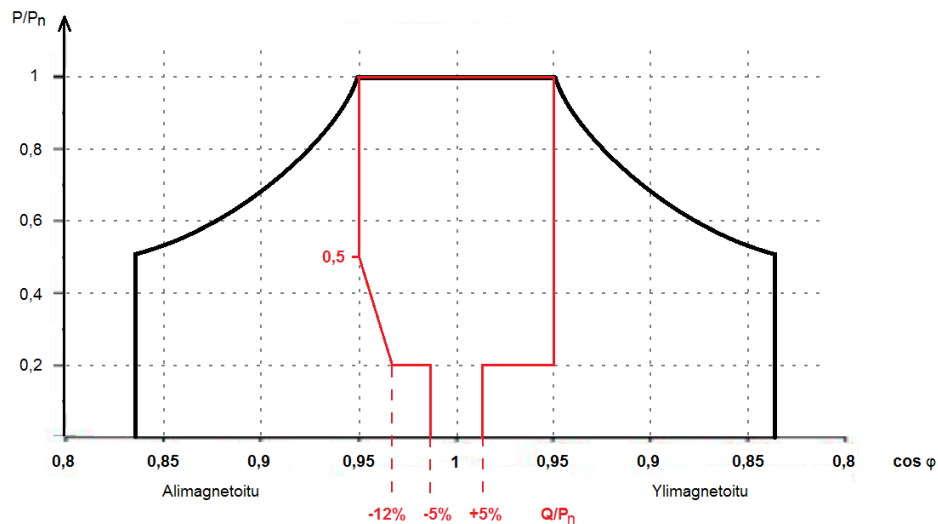
Kuva 13. Eri verkko-operaattoreiden pätötehon tuottovaatimukset taajuuden suhteen. Energinet.dk:n vaatimuksiin on liitetty myös kuvan mukainen harmaa alue, jossa ei ole tehon tuottovaatimuksia. Tähdellä merkityjä kohtia on tarkennettu tekstissä.

2.2.3 Vaatimukset loistehon kulutukselle ja tuotannolle

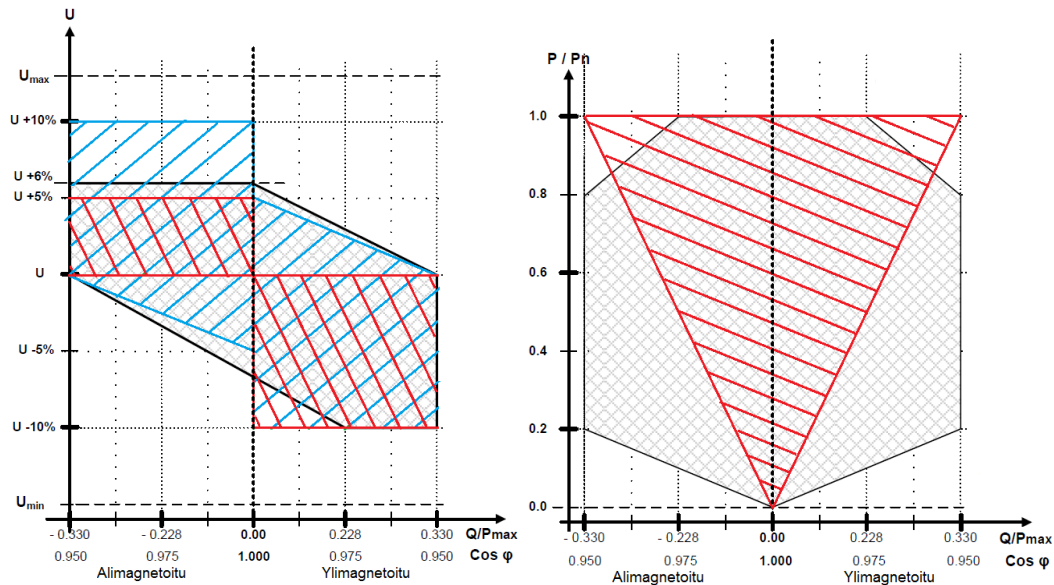
Vertailtavista maista Saksa on ainoa, jonka verkkovaatimuksissa loistehon tuotanto- ja kulutusvaatimukset ei-synkronisille voimalaitoksille vastaavat tahtigeneraattoreiden vaatimuksia. Nämä ovat esitettyinä kuvassa 6 kolmena vaihtoehtoisena alueena. [6]

National Gridillä ja EirGridillä loistehon tuotanto ja kulutus on suhteutettu ainoastaan pätötehon tuotantoon. Nämä vaatimukset on esitetty kuvassa 14. Huomionarvoista on se, miten paljon suuremmalla loistehovälillä EirGridin verkkoon kytkettyjen tuuli-voimaloiden täytyy toimia, kun vertaa muihin verkko-operaattoreihin. [9] [10]

Fingridin ja Energinet.dk:n loistehovaatimukset on sidottu sekä jännitteeseen, että pätötehoon. SONIn loistehovaatimukset riippuvat taas pelkästään jännitteestä, kuten tavanomaisilla voimaloillakin. Jänniteriippuvuus on näillä kaikilla kolmella verkko-operaattorilla hyvin samankaltainen, kun taas pätötehon suhteen vaatimukset vaihtelevat hyvinkin paljon eri operaattoreiden välillä. Fingridin, Energinet.dk:n ja SONIn loistehovaatimukset on esitetty kuvassa 15. [3] [8] [11]

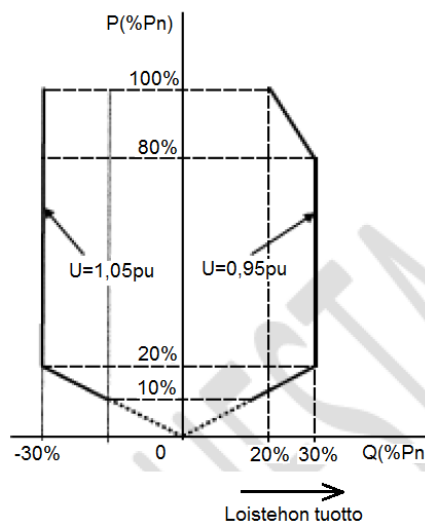


Kuva 14. Mustalla viivalla EirGridin ja punaisella viivalla National Gridin loistehoalue pätötehon suhteen. Muokattu lähteistä [9] [10]



Kuva 15. Vasemmalla loistehovaatimukset jännitteen mukaan ja oikealla pätötehon mukaan. Harmaalla ruudutettu alue on Energinet.dk:n vaatimus, punaraitainen alue Fingridin vaatimus ja siniraitainen alue SONIn vaatimus. Muokattu lähteistä [3] [8] [11]

Espanjan loistehovaatimus on sidonnainen sekä pätötehoon että jännitteeseen. Loistehon tuotantoa vaaditaan maksimissaan 30 % nimellisestä pätötehosta, kun jännite on laskenut minimissään 0,95 p.u:iin ja kulutusta saman verran, kun jännite on noussut maksimissaan 1,05 p.u:iin. Alle 10 % pätöteholla toimittaessa loistehoa täytyy pystyä kuluttamaan tai tuottamaan niin paljon, kuin on teknisesti mahdollista. Espanjan loistehovaatimus on esitetty kuvassa 16. Loistehon tulee säätää jännitteen mukaan kuten synkronigeneraattoreiden tapauksessa, mikä esitettiin kuvassa 7. [5]

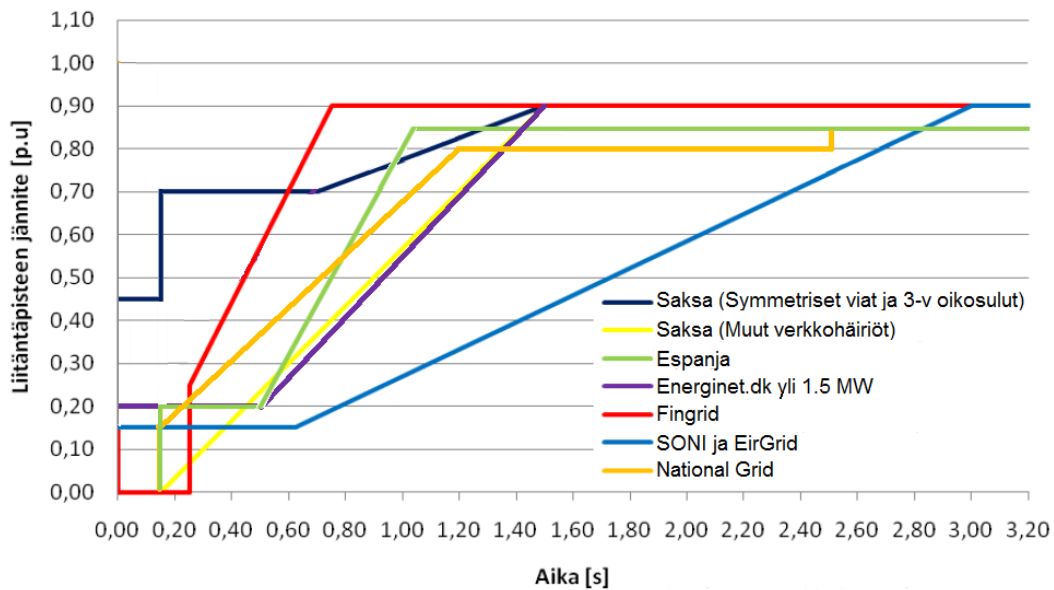


Kuva 16. Espanjan loistehovaatimus pätötehon ja jännitteen suhteen. Muokattu lähteestä [5]

2.2.4 Syvän jännitekuopan sietokyky

Fingridin ja National Gridin verkkoihin kytkettyjä ei-synkronisia voimalaitoksia koskevat samat vaatimukset syvän jännitekuopan suhteen, kuin tahtigeneraattoreitakin. Kaikilla muilla vertailtavilla verkko-operaattoreilla vaatimukset poikkeavat tahtigeneraatto-

reiden vaatimuksista. Saksaa lukuun ottamatta syvän jännitekuopan sietokyky on ilmaistu yhdellä jännite-aikatason käyrällä, jonka yläpuolella laitoksen täytyy pysyä kytkeytyneenä verkkoon. Saksan vaatimukset ovat vastaavat symmetrisissä vioissa, jolloin jännitekuoppavaatimus onkin huomattavasti helpompi kestää Saksassa kuin muiden maiden operaattoreiden alueella. Muiden operaattoreiden vaatimustasoa vastaakin vain muita verkkohäiriöitä varten luotu toinen käyrä, jonka yläpuolella toimittaessa voimalaitoksen ei saa kytkeytyä irti verkosta yksi- tai kaksivaiheisten oikosulkujen vuoksi. Saksan ohella Tanskan ja Irlannin saaren verkko-operaattorit eivät vaadi ei-synkronisilta voimalaitoksilta nollajännitteen kestoa lainkaan, mutta EirGridin ja SONIn jännitekuoppa on leveämpi kuin muilla ja siten vaikeampi sietää. Eri maiden verkko-operaattoreiden syvän jännitekuopan sietokyvyn vaatimukset on esitetty kuvassa 17. [3-10] [11]



Kuva 17. Syvän jännitekuopan sietokykyvaatimukset eri verkko-operaattoreilla.

2.2.5 Harmoniset jännitteet ja virrat

Monella vertailuryhmän verkko-operaattorista ei ole yleisiä vaatimuksia harmonisille jännitteille ja virroille, joten niitä ei saa järkevästi vertailtua. Kun taajuusmuuttajista on kysymys, harmoniset jännitteet ja virrat ovat merkittävä tekijä verkkoon liityntää suunnitellessa, sillä taajuusmuuttajat ovat tunnetusti yliaaltolähteitä. Tässä osiossa käsitellään lyhyesti Fingridin vaatimukset yliaalloille 110 kV verkossa. Maksimirajat Fingridin 110 kV verkon jännitteen ja virran yliarvoille on esitetty taulukossa 10. Jännitteen yliaallot ovat yksiselitteisesti taulukkomuodossa ja kukin harmoninen yliaalto on erikseen määritelty. Virran yliaaltojen kohdalla on ilmoitettu virran suurin sallittava kokonaissärö, vastakomponentin maksimiarvo sekä virran psfometriarvo, joka määritellään kaavan 2 avulla.

$$[12] \quad I_p = \frac{1}{1000} * \sqrt{\sum_{h=1}^{h=100} (p_h * I_h)^2} \quad (2),$$

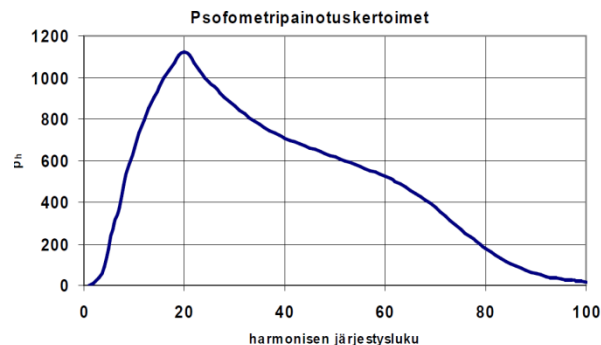
jossa I_h on vaihevirran h :s harmoninen komponentti, h on harmoninen järjestysluku ja p_h on taajuuspainotuskerroin harmoniselle h . Taajuuspainotuskerroin on esitetty käyränä harmonisen komponentin funktiona kuvassa 18. [12]

Tällä psfometripainotuskertoimella pystytään hallitsemaan virran spektriä. Kuten kuvasta 18 nähdään, painotuskerroin on huipussaan 20. yliaallon kohdalla. Jos spektrissä on paljon 20:a yliaaltoja, spektri ei saa sisältää niin paljon muita yliaaltoja jos verrataan tilanteeseen, jossa spektrissä on paljon esimerkiksi 60:a yliaaltoja. Tämä siksi, että psfometriakertoimeen summataan koko yliaaltosisältö 100 ensimmäisen yliaallon osalta.

Taulukko 10. Fingridin 110 kV verkon jännitteen ja virran yliaaltorajat. [12]

HARMONISTEN JÄNNITTEIDEN MAKSIMITASOT 110 kV VERKOSSA					
Prosentteina nimellisjännitteestä					
Parittomat ei kolmella jaolliset		Parittomat kolmella jaolliset		Parilliset	
n	%	n	%	n	%
5	3	3	3	2	1
7	2,5	9	1,5	4	0,7
11	1,7	15	0,5	6	0,5
13	1,7	21	0,5	>6	0,3
17	1,5	>21	0,3		
19	1,5				
23	0,8				
25	0,8				
>25	0,5				
Jännitteen kokonaisharmoninen särö				< 3 %	

SALLITUT EMISSIOVIR RAT	
% liittyjän referenssivirrasta	
Virran kokonaissärö	6 %
Vaihevirran psfometriarvo	5 A
Virran vastakomponentti	20 %



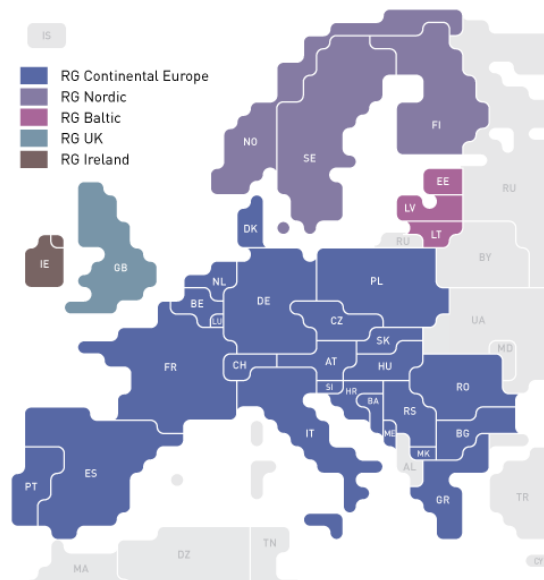
Kuva 18. Taajuuspainotuskerroin harmonisen yliaallon funktiona. [12]

2.3 ENTSO-E:n verkkokoodiluonnos

ENTSO-E on eurooppalainen kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö, jonka toiminta ulottuu 34 maahan Euroopassa. Se on korvannut edelliset kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestöt ja ne ovat nykyään ENTSO-E:n alueellisia ryhmiä, jotka jakaantuvat synkronialueittain. ENTSO-E:n synkronialueet on esitetty kuvassa 19. ENTSO-E on luonut yleisen eurooppalaisen verkkokoodin Euroopan Unionin Energia-alan Sääntelyviranomaisen Yhteistyövirasto ACERin (Agency for the Cooperation of Energy Regulators) toimeenpanemana. Tästä verkkokoodista oli tämän diplomityön työn tekohetkellä julkaistu luonnos, joten lopullinen verkkokoodi saattaa poiketa tässä työssä esitetystä. [1]

Verkkokoodin luonnos rakentuu yhteisiin sääntöihin, joita tarkennetaan tarvittaessa synkronialueittain. Tämä koodi pätee kaikille generaattorityypeille, eikä siinä erotella voimaloita primäärienergian mukaan. Voimalaitosten jako luokkiin tehdään ENTSO-E:n verkkokoodissa liittymispisteen jännitteen, voimalaitoksen tehon ja sen mukaan, onko voimalaitoksessa tahtigeneraattori vai ei. Jako jännitteen ja tehon mukaan on esi-

tetty synkronialueittain taulukossa 11. Verkkokoodi rakentuu rekursiivisesti teholuokan kasvaessa, eli pienemmän teholuokan vaatimukset pätevät myös isomman teholuokan voimalaitoksille, ellei erikseen mainita muuta. Tämän diplomityön aiheen vuoksi tästä verkkokoodista käsitellään vain maalla sijaitsevien D-tyyppin ei-synkronisten generaattoreiden vaatimuksia samoilta osin, kuin nykyisiä verkkovaatimuksiakin on tässä työssä käsitelty. Verkkokoodissa esiintyviä synkronialuekohtaisia tarkennuksia ei käsitellä Baltian alueen osalta, koska nykyisiä verkkokodeja alueelta ei ole käsitelty työssä. ENTSO-E:n verkkokoodissa ei esitetä yleisiä rajoja harmonisille yliaalloille, joten niiden hallinta säilyy verkko-operaattorikohtaisena.[13]



Kuva 19. ENTSO-E:n synkronialueet. [1]

Taulukko 11. ENTSO-E:n uuden verkkokoodin generaattoreiden jako luokkiin. Jos voimalaitoksen liittymispisteen jännite on 110 kV tai enemmän, generaattori on D-tyyppiä. Jos jännite on pienempi, kuin 110 kV, tulee myös tehorajan ylittyä, jotta generaattori luokitellaan D-tyypiksi.

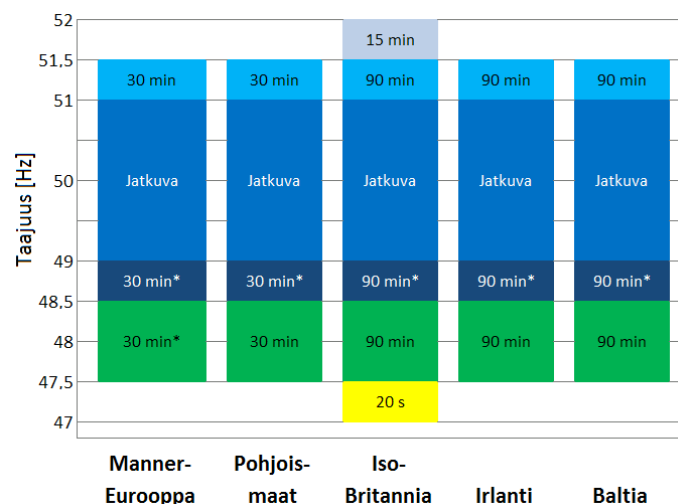
Synkronialueet	Generaattorin tyyppi				
	A	B	C	D	
Manner-Eurooppa	$0,4 \text{ kW} \leq P < 1 \text{ MW}$	$1 \text{ MW} \leq P < 50 \text{ MW}$	$50 \text{ MW} \leq P < 75 \text{ MW}$	$P \geq 75 \text{ MW}$	$U \geq 110 \text{ kV}$
Pohjoismaat	$0,4 \text{ kW} \leq P < 1,5 \text{ MW}$	$1,5 \text{ MW} \leq P < 10 \text{ MW}$	$10 \text{ MW} \leq P < 30 \text{ MW}$	$P \geq 30 \text{ MW}$	
UK	$0,4 \text{ kW} \leq P < 1 \text{ MW}$	$1 \text{ MW} \leq P < 10 \text{ MW}$	$10 \text{ MW} \leq P < 30 \text{ MW}$	$P \geq 30 \text{ MW}$	
Irlanti	$0,4 \text{ kW} \leq P < 0,1 \text{ MW}$	$0,1 \text{ MW} \leq P < 5 \text{ MW}$	$5 \text{ MW} \leq P < 10 \text{ MW}$	$P \geq 10 \text{ MW}$	
Baltia	$0,4 \text{ kW} \leq P < 0,1 \text{ MW}$	$0,1 \text{ MW} \leq P < 5 \text{ MW}$	$5 \text{ MW} \leq P < 15 \text{ MW}$	$P \geq 15 \text{ MW}$	
	$U < 110 \text{ kV}$				

2.3.1 Jännite- ja taajuusrajat

Voimalaitosten taajuusrajat ovat eri synkronialueilla samat lukuun ottamatta Ison-Britannian lisävaatimuksia. Aikamääreet verkossa pysymiseen kuitenkin vaihtelevat synkronialueittain. Taajuusrajat voimalaitosten verkossa pysymiselle on esitetty kuvassa

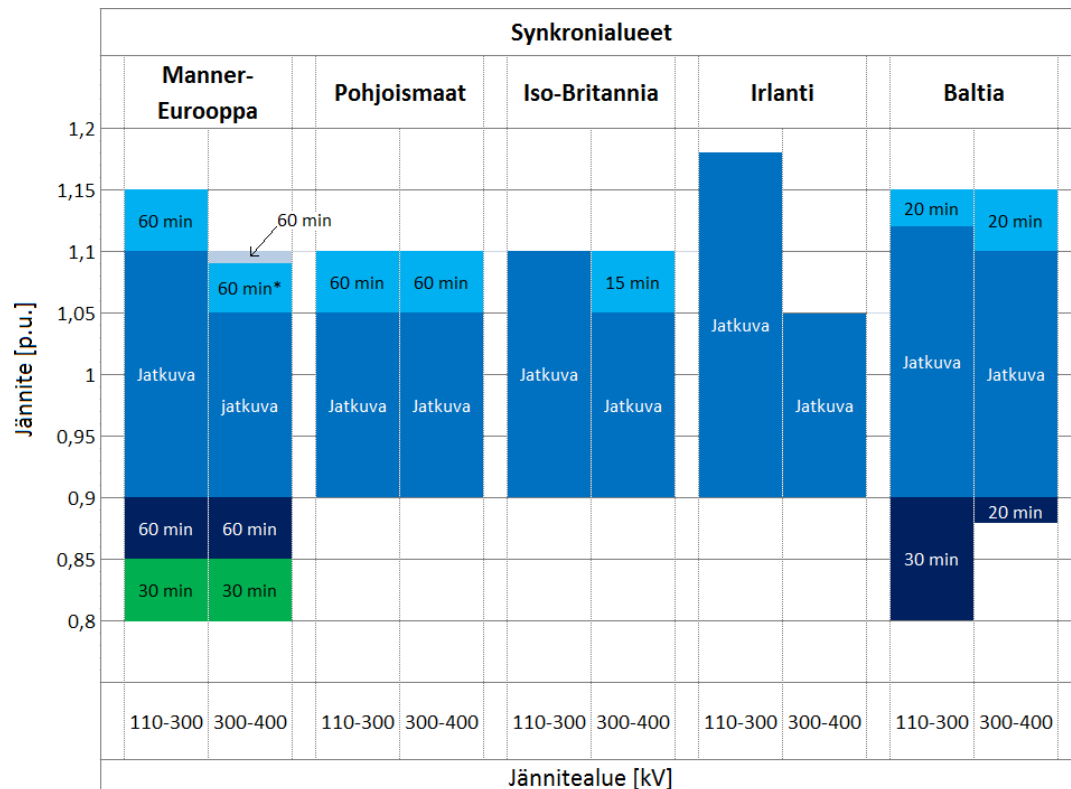
20. Nämä vaatimukset ovat voimassa jo teholuokasta A alkaen kaikille generaattorityypeille. Kuvasta voidaan todeta Tanskan tilanteen helpottuminen, sillä kummallakin synkronialueella, joihin se kuuluu, on samat taajuusrajat. Toisaalta Tanskan vaatimukset tuulivoimaloille ovat nykyään monimuotoisemmat ja niihin liittyy lisäksi pätötehon tuottovaatimuksia, joten verkko-operaattori voi joutua asettamaan lisärajoja voimaloille. ENTSO-E:n vaatimuksiin sisältyy teholuokasta A alkaen pätötehon pudotus taajuusalueella 50,2...50,5 Hz enimmillään 2-12 % nimellistehosta ottaen huomioon voimalaitostyyppin asettamat rajoitukset. Tämä ei kata läheskään kaikkia Tanskan kuvassa 13 esitetyjä vaatimuksia tuulivoimaloille, jotka alkavat jo teholuokasta 25 kW. [11] C-tyyppin generaattoreille tulee lisävaatimuksena samanlainen toiminta alataajuuksille, tarkemmin taajuusalueelle 49,5...49,8 Hz. Tällöin pätötehoa tulee nostaa vastaava määrä, kuin ylätaajuuksilla lasketaan tehoa. Näiden vaatimusten lisäksi voimalaitoksen tulee pystyä yleiseen pätötehon säätöön taajuuden funktiona siten, että kuollutta kaistaa voidaan säätää välillä 0...500 mHz ja pätötehoa lasketaan ylätaajuuksilla ja nostetaan alataajuuksilla enimmillään 10 % lineaarisella muutoksella. [13]

Taajuuden nopeiden muutosten sietokyky on ENTSO-E:n koodissa yhtenäistetty arvoon 2 Hz/s. Tämä ylittää ainoastaan SONIn ja EirGridin nykyiset 0,5 Hz/s vaatimukset. [8][9][13]



Kuva 20. Taajuusrajat eri synkronialueille. Aikamääreet tarkoittavat vähimmäisaikaa, jonka voimalaitoksen tulee pysyä kytkeytyneenä verkkoon taajuusalueella. Tähdellä merkityt kohdat ovat vähimmäisvaatimuksia, joita verkko-operaattorit voivat tiukentaa halutessaan. [13]

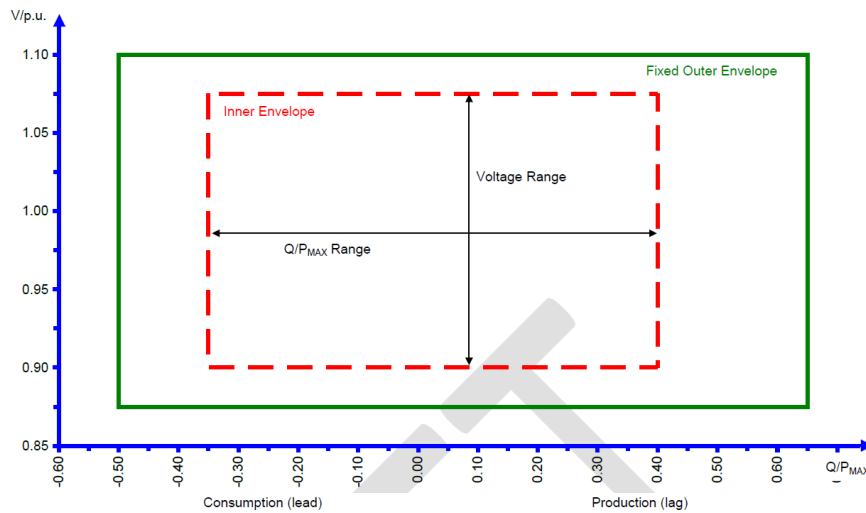
Jänniterajat esitetään ENTSO-E:n verkkokoodissa vasta D-tyyppin generaattoreiden yleisvaatimuksissa. Alemmissa teholuokissa voimalaitoksen käyttäytyminen jännitteen suhteen määrittää verkko-operaattori. C-tyyppin generaattoreilta vaaditaan jo automaattista irtikytkeytymistä verkko-operaattorin määräämästä jännitteestä. B-tyyppin ei-synkronisilta generaattoreilta vaaditaan verkon kolmivaiheisissa vikatilanteissa maksimissaan 40 millisekunnin reagointiajalla loisivirran verkkoon syöttöä aina 1 p.u. asti jos jännite putoaa 50 prosenttiin nimellisestä. Myös loisivirran kulutusta vaaditaan, mikäli jännite nousee liikaa. Vertailuryhmästä vain Saksalla ja Espanjalla on erikseen tällainen vaatimus nykyisiin verkkovaatimuksiin kirjoitettuna [5] [6]. D-tyyppin generaattoreiden staattisen tilan jänniterajat on esitetty synkronialueittain kuvassa 21. [13]



Kuva 21. Jänniterajat synkroni- ja jännitealueittain. Tähdellä merkityt kohdat ovat vähimmäisvaatimuksia, joita verkko-operaattorit voivat tiukentaa halutessaan. [13]

2.3.2 Vaatimukset loistehon kulutukselle ja tuotannolle

Loistehorajat on puettu ENTSO-E:n verkkokoodissa synkronialueittain poikkeuksellisesti maksimirajoihin, kun kyse on voimalan toiminnasta nimellisteholla. Loistehon tuotolle ja kulutukselle on tehty vaatimukset generaattoreille teholuokassa C erikseen synkronisille ja ei-synkronisille generaattoreille. Seuraavaksi käsitellään ei-synkronisille generaattoreille asetettuja vaatimuksia. Kuvassa 22 on esitetty alueet, joiden ulkopuolelle loistehon tuotto- ja kulutusprofiili ei saa ulottua täydellä teholla toimittaessa. Kuvassa punaisella katkoviivalla on alue, jonka sisään loistehoprofiilin tulee mahtua. Vihreällä kiinteällä viivalla on alue, jonka sisään loistehoprofiili tulee sijoittaa. Loistehoprofiilin ei tarvitse siis olla nelikulmio, eikä sen tarvitse sijoittua symmetrisesti nollaloistehon ympärille. Katkoviivalla esitetyn alueen rajat on eritelty synkronialueittain taulukossa 12. Pohjoismaiden alue on levein arvolla 0,95, joten jos se sijoitetaan esimerkiksi siten, että $-0,45 \dots Q/P_{\max} \dots 0,5$, se vastaa tehokertoimen $\cos\phi$ vaihteluväliä kolmen desimaalin tarkkuudella 0,912(alimagnetoitu) \dots 0,895(ylimagnetoitu). Suomen nykyiset vaatimukset sopivat uusiin raameihin muuttamatta myös jännitteen osalta. [3] [13]



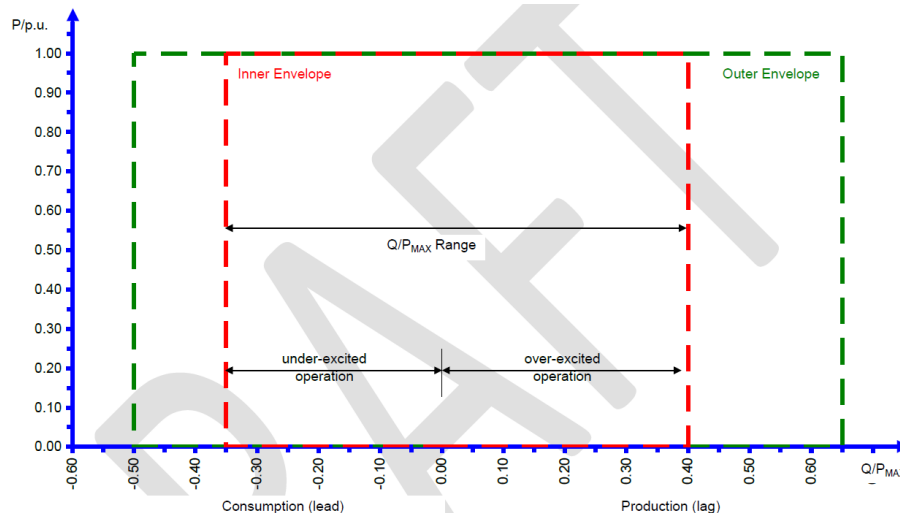
Kuva 22. Loistehon toiminta-alueet voimalaitoksen toimiessa nimellisteholla. [13]

Taulukko 12. Synkronialuekohtaiset tarkennukset kuvan 22 sisemmän alueen rajoihin. Vertailun vuoksi taulukossa on myös synkronisille generaattoreille asetetut tehorajat.

Jännitealueet ovat samat kummallakin generaattorityypillä. [13]

Synkronialueet	Loistehoalueen maksimi Q/P _{max} ei-synkronisille generaattoreille	Jatkuvan tilan jännitteen maksimialue [p.u.]	Loistehoalueen maksimi Q/P _{max} synkronisille generaattoreille
Manner-Eurooppa	0,75	0,225	0,95
Pohjoismaat	0,95	0,150	0,95
UK	0,66	0,100	0,95
Irlanti	0,66	0,218	1,08
Baltia	0,80	0,220	1,00

Vaatimukset on kohdennettu loistehon osalta erikseen voimalan toiminnalle osateholla. Tässä tapauksessa voimalaitoksen tulee pystyä toimimaan vähintään kuvassa 23 esitetyn punaisen katkoviivan alueella ja maksimissaan vihreän katkoviivan alueella. Kaikilta ei-synkronisilta voimalaitoksilta vaaditaan siis osateholla loistehon tuotantoa vähintään 40 % maksimipätötehostä ja loistehon kulutusta vähintään 35 % maksimipätötehostä. Tämän takia esimerkiksi Suomen täytyy muuttaa merkittävästi tuulivoimaloiden loistehon tuotanto- ja kulutusmallia, joka nykyisellään vaatii sitä pienempää loistehon kulutusta ja tuottoa, mitä pienempi pätöteho on suhteessa voimalaitoksen maksimiin [3]. Kaikki verkko-operaattorit vertailuryhmästä joutuvat lisäämään vaatimuksia loistehon kulutukselle ja tuotannolle voimalaitoksen toimiessa osateholla, sillä uusissa vaatimuksissa vaaditaan kykyä loistehon tuottoon vähintään 0,4 p.u. ja kulutukseen vähintään 0,35 p.u., vaikka pätötehoa ei tuotettaisikaan. [13]

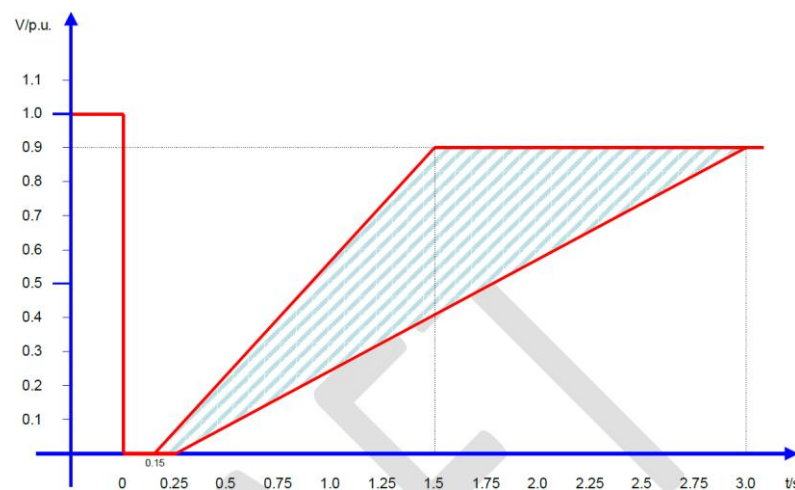


Kuva 23. Vaatimukset loistehon kulutukselle ja tuotannolle voimalaitoksen toimiessa osateholla. [13]

2.3.3 Syvän jännitekuopan sietokyky

Syvän jännitekuopan sietäminen määritellään ENTSO-E:n verkkokoodissa yhden pääjännitteen perusteella. Tarkemmin sen verkkoonliittymispisteessä mitatun pääjännitteen perusteella, joka on vian sattuessa kaikista pienin. Verkkokoodin luonnoksessa on siis yhdistetty yksi- ja kolmivaiheisten oikosulkujen sietäminen yhteen käyrään.

ENTSO-E:n verkkokoodissa on annettu vaihteluväli, jonka sisään verkko-operaattoreiden tulee luoda oma vaatimuksensa. Vaihteluvälin yläraja on sama kuin Saksan uusiutuvien tuotantomuotojen kohdalla määrätty muiden, kuin kolmivaiheisten vikojen sietoraja. Alaraja on sama kuin Irlannin saaren verkko-operaattoreilla, mutta laajennettuna nollijännitteeseen saakka vian alkuhetkillä. Uusi vaatimus on siis vaativampi kuin yksikään vertailuryhmän ei-synkronisten tuotantomuotojen syvän jännitekuopan sietovaatimus. Vaatimus syvän jännitekuopan sietokyvylle teholuokan D ei-synkroniselle generaattorille on esitetty kuvassa 24. Teholuokasta B ylöspäin kuopan profiili on vastaava sillä erolla, että vian alkuhetkillä siedettävä jännite on välillä 0,05-0,15 p.u. [13]



Kuva 24. Syvän jännitekuopan sietokyvyn profiili D-tyyppin ei-synkronisille generaattoreille ENTSO-E:n verkkokoodissa. [13]

ENTSO-E:n uuden verkkokoodin luonnoksen voi todeta olevan suurilta osin yhdistetyn nykyisistä eri maiden verkko-operaattoreiden verkkovaatimuksista. Sen tarkoitus on yhtenäistää EU:n sisäisiä säädöksiä ja joiltakin osin verkkovaatimukset ovat hyvin samankaltaiset eri synkronialueiden välillä. Esimerkiksi taajuusrajat ei-synkronisille laitoksille ovat lähes samat, kun nykyisissä verkkovaatimuksissa eroja on sekä taajuusrajoissa että siinä, minkälaisia toimenpiteitä ylä- ja alataajuuksilla on.

Jänniterajat ovat pääasiassa vaativammat ENTSO-E:n verkkokoodiluonnoksessa, kuin nykyisissä verkkovaatimuksissa. Ainoastaan Suomella on vertailuryhmästä vaativammat jänniterajat nykyisissä verkkovaatimuksissa kuin verkkokoodiluonnoksessa. Manner-Euroopan kohdalla alajännitteillä olevat vaatimukset kiristyvät, kun taas Irlannin synkronialueella tulee tulevaisuudessa sietää huomattavan suuria ylijännitteitä.

Loistehon tuotanto- ja kulutusvaatimukset kovenevat Suomen osalta osateholla toimiessa. Muiden maiden loistehokäyttäytyminen pystytään pitämään samankaltaisena kuin nykyään, sillä rajat eivät muutu merkittävästi. Loistehon tuotannossa ja kulutuksessa on annettu kuitenkin ENTSO-E:n verkkokoodiluonnoksessa melko vapaat kädet verkko-operaattoreille, sillä aluetta, jolla loistehoa tuotetaan ja kulutetaan nimellisteholla, voidaan siirtää toisten rajojen sisällä.

Voimalaitosten syvän jännitekuopan sietokykyä tulee tulevaisuudessa parantaa, jotta se vastaisi uuden verkkokoodiluonnoksen vaatimuksiin. Vaikka ENTSO-E:n syvän jännitekuopan profiiliin on otettu mallia nykyisistä eurooppalaisista käyristä, ei yksikään niistä ole niin vaativa, kuin luonnoksessa esitetty.

Tanska jaetaan ENTSO-E:n luonnoksessa edelleen kahtia verkkovaatimusten osalta johtuen sen kytkeytymisestä kahteen eri synkronialueeseen. Esimerkiksi loistehorajat ja jänniterajat eriävät merkittävästi näiden kahden synkronialueen välillä. Tanskan tulee siis joiltakin osin käyttää kaksia eri verkkovaatimuksia. Toisaalta esimerkiksi syvän jännitekuopan sietokyvyn kohdalla tarkan profiilin määrittäminen on verkkokoodiluonnoksessa verkko-operaattorikohtaista, joten Tanska pystynee yhtenäistämään omaa verkkokoodiaan joiltakin osin.

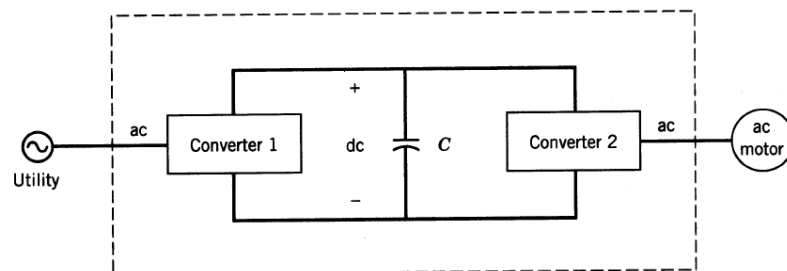
Tässä osiossa esiteltiin eri eurooppalaisten verkko-operaattoreiden verkkovaatimuksia voimantuotantolaitoksille. Vaatimukset eriteltiin nykyisiin tavanomaisten voimalaitosten vaatimuksiin, nykyisiin ei-synkronisien voimalaitosten vaatimuksiin, sekä luotiin katsaus tulevaisuudessa käyttöön otettavaan, yleiseurooppalaiseen verkkokoodiin.

3 Taajuusmuuttajan verkkoliityntä

Yleisesti käytetyillä pienjännitteisillä taajuusmuuttajilla ohjataan nykyään suurta osaa uusista pienjännitteisistä sähkömoottoreista. Niillä voidaan ohjata myös pienjännitteisiä generaattoreita esimerkiksi pienessä koskivoimalassa tai CHP-laitoksessa (Combined Heat and Power). Taajuusmuuttajien käyttö on kuitenkin tekniikan kehittymisen myötä mahdollista jopa kymmenien megawattien tehoisissa laitteissa ja teknis-taloudellisesti tarkastellen tässä teholuokassa voi olla järkevää käyttää keskijännitteisiä taajuusmuuttajia, moottoreita ja generaattoreita. Keskijännitelaitteilla pystytään rakentamaan suurempitehoisia laitoksia kuin pienjännitelaitteilla ja sähkön laatua saadaan parannettua verrattuna suuritehoisiin pienjännitelaitoksiin. Luonnollinen rajausta suuritehoisen ja pienitehoisen taajuusmuuttajan välillä lieneekin siirtyminen pienjännitelaitteista keskijännitelaitteisiin. Tässä työssä tarkastellaan suuritehoisia taajuusmuuttajia ja keskijännitetaajuusmuuttajien tekniikkaa verrataan pienjännitetaajuusmuuttajien tekniikkaan, jotta lukijalle tulisi käsitys keskijännitetekniikan eduista suuritehoisissa taajuusmuuttajissa.

Suuritehoisista taajuusmuuttajatyypeistä yleisimpiä ovat jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja (VSI, Voltage Source Inverter), virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja (CSI, Current Source Inverter) ja syklokonvertteri. Kaikissa käytetään puolijohdekytkimiä, mutta tekniikat ovat erilaisia ja parhaiten sopivat käyttötarkoitukset vaihtelevat. Seuraavaksi esitellään jännitevälipiirillistä taajuusmuuttajatekniikkaa sekä suuritehoisista laitteista syvennyttään kolmitasoiseen jännitevälipiirilliseen pulssinleveysmoduloituun taajuusmuuttajaan.

Yleisin taajuusmuuttajatyyppeistä pienjännitteisissä taajuusmuuttajissa on jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja. Se koostuu tasasuuntaussillasta, tasajännitevälipiiristä ja vaihtosuuntaussillasta. Tasasuuntaussilta voidaan toteuttaa diodeilla, tyristoreilla tai puolijohdekytkimillä. Tasajännitevälipiiri toteutetaan kondensaattoriparistolla joka osaltaan suodattaa jännitepiikkejä ja osaltaan varastoi energiaa. Vaihtosuuntaussillassa täytyy käyttää puolijohdekytkimiä tai itsekommutoivia tyristoreita, sillä vaihtosuuntaajalla muokataan tasajännitteestä vaihtojännitettä jolloin kytkimiä pitää pystyä ohjaamaan. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan periaatekuva on esitetty kuvassa 25. Taajuusmuuttajien vaihtosuuntaajan ohjaus voidaan toteuttaa monella eri tavalla, joista tässä työssä käsitellään pulssinleveysmodulaatiota (PWM, Pulse Width Modulation) sen suuren suosion vuoksi.

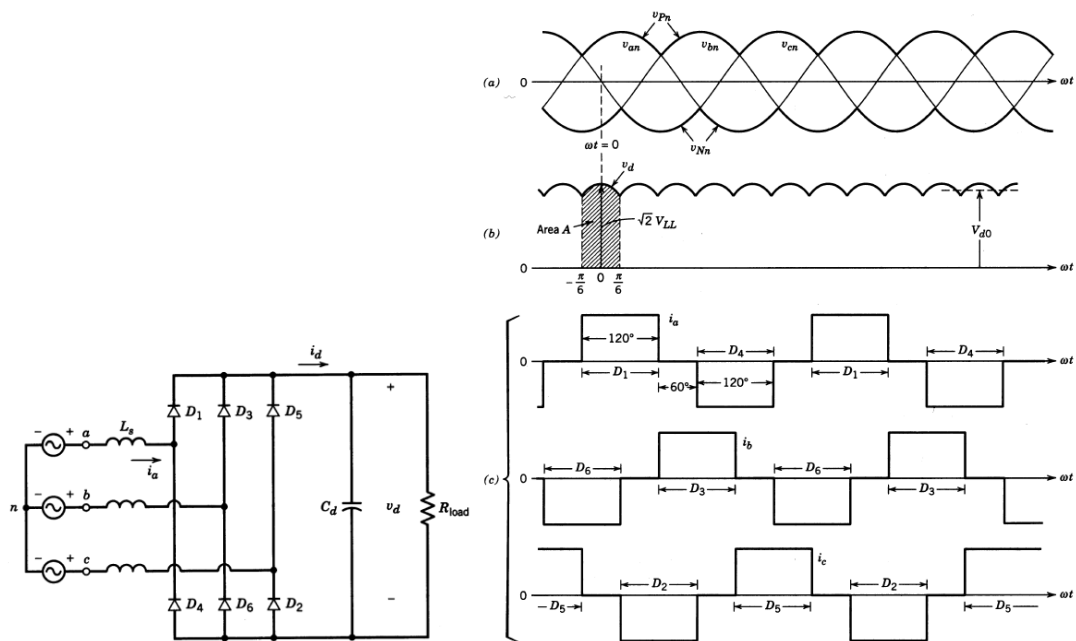


Kuva 25. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan periaatekuva. Converter 1 on tasasuuntaaja, C on tasajännitevälipiirin kondensaattoriparisto ja Converter 2 on vaihtosuuntaaja.

3.1 Diodeilla toteutettu verkkosuuntaaja

Tasasuuntaussillan komponenttivalitsohdot punnitaan tapauskohtaisesti, sillä tasasuuntauksen laadun parantaminen lisää laitteen hintaa. Halvin vaihtoehto on diodisilta, jonka kytkentä ja käyrämuodot on esitetty kuvassa 26. Kyseessä on kolmivaiheinen kaksitietasasuuntaus eli kuusipulssisilta. Diodisilta ei tarvitse ohjausta, jonka takia laitteen hinta on matala. Diodisillalla ei kuitenkaan voi siirtää tehoa kuin verkosta laitteeseen päin, mikä rajoittaa laitteen käytettävyyttä. [15] Monet moottorikäytöt ovat kuitenkin yksinkertaisia nopeussäätäjiä eivätkä vaadikaan verkkoon jarruttamista joten diodisilta on suosittu. Verkkoon jarruttamisen puuttuminen voidaan kompensoida tasajännitepiiriin asennettavalla jarrukatkajalla ja tehovastuksella, jolloin moottoria voidaan jarruttaa taajuusmuuttajalla.

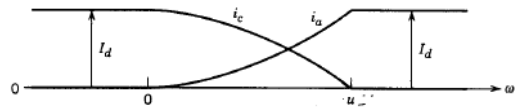
Kuusipulssista diodisiltaakin yksinkertaisempi tasasuuntaaja olisi kolmivaiheinen yksitietasasuuntaus, jossa käytetään vain kolmea diodia. Puolijohteiden hinta on tällöin alhaisempi, mutta kytkentä tarvitsee syöttömuuntajan, sähkön laatu on huonompaa sekä puolijohteiden jänniterasitukset ovat suuremmat kuin kuusipulssikytkennällä. Tehon kasvaessa kuusipulssisillan hintakin on pienempi, joten kolmipulssisen kytkentää ei tarkastella tässä työssä enempää. [15]



Kuva 26. kuusipulssisen diodisillan kytkentä sekä sille ominaisia käyrämuotoja. a) Sillan vaihejännitteet, b) Tasasuunnattu jännite, c) Sillan vaihevirrat. [14]

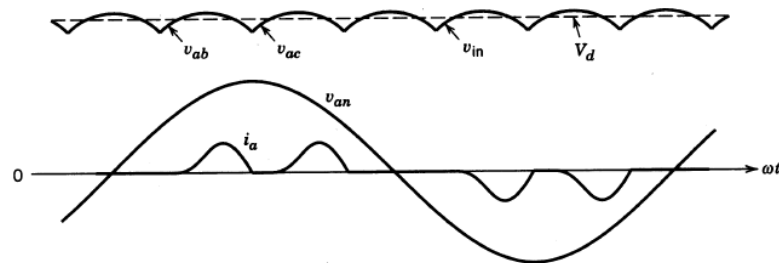
Diodisillan diodeista kolme ovat suurimman jännitearvon valitsimia (D_1 , D_3 , D_5) ja toiset kolme ovat pienimmän jännitearvon valitsimia (D_2 , D_4 , D_6). Välipiirin tasajännite on siis sillan suurimman ja pienimmän jännitteen hetkellisarvojen erotus. Tämä on esitetty kuvan 26 kohdissa a) ja b). Samassa kuvassa esitettyjen virtojen oletetaan kulkevan hyvin suuren induktanssin läpi, joten virtojen käyrämuodot eivät täysin vastaa todellisuutta. Todellisuudessa tasavirtapiiriin induktanssi on rajallinen ja välipiirissä on tasajännite, jonka takia diodit eivät johda niin pitkiä aikoja kuin ideaalitalanteessa. Lisäksi virran kommutoiminen diodilta toiselle ei tapahdu niin nopeasti kuin ideaalitalanteessa verkkoinduktanssin vuoksi, vaan kommutointikulman μ verran viivästettynä. Kommutointikulman suuruus riippuu kommutoitavan virran suuruudesta, verkon induktanssista sekä suuntaajan syöttöjännitteestä. Kommutoimisen aikana sillassa johtaa kaksi saman

ryhmän puolijohdetta samaan aikaan, jolloin syntyy viivettä sekä virtapalkkien reunojen pyöristymistä. Virran kommutointikäyrämuotoja on havainnollistettu kuvassa 27.



Kuva 27. Virran kommutointi diodilta toiselle. [14]

Jos virtapiirissä ei ole tarpeeksi isoa induktanssia, virran käyrämuoto on kuvan 28 tapainen, jolloin muun muassa virran yliaaltosisältö on suurempi kuin optimoidussa tilanteessa. Koska välipiirissä on jännite joka on noin tasasuunnatun verkkojännitteen keskiarvon suuruinen, välipiirissä on välillä suurempi jännite kuin sillassa ja välillä toisin päin. Sillan diodit eivät johda silloin kuin välipiirissä on suurempi jännite kuin sillassa ja tällöin virta aukottuu kuvan 28 mukaisesti. Induktanssin lisääminen verkkoon tai välipiiriin muuttaa tasavirran jatkuvaksi. [15]



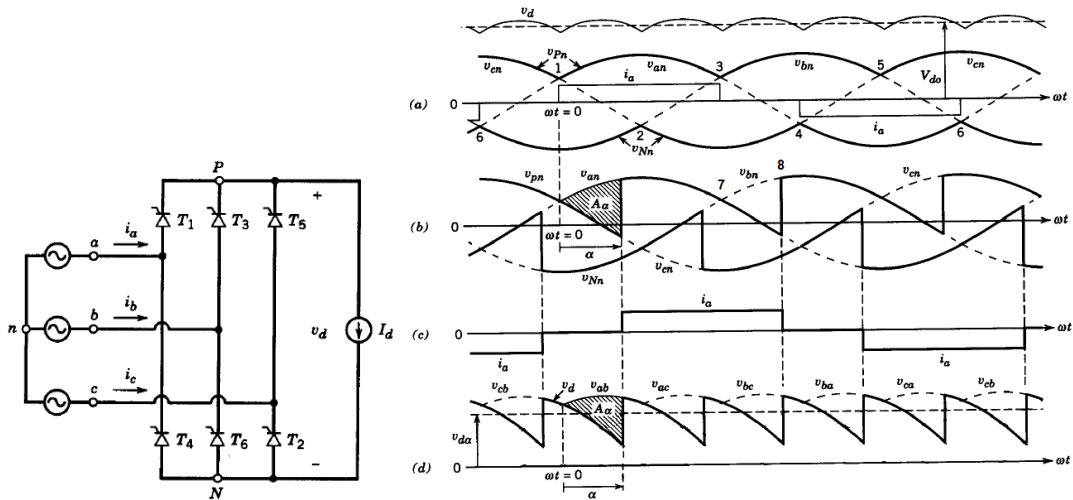
Kuva 28. Yläpuolella tasasuunnattu verkkojännite sekä välipiirin tasajännite. Alapuolella verkon vaihejännite sekä aukottunut vaihevirta. [14]

3.2 Tyristoreilla toteutettu verkkosuuntaaja

Diodit syttyvät ja sammuvat anodi-katodijännitteen polariteetin perusteella. Tyristori vaatii tämän lisäksi syttyäkseen ohjausvirtapulssin hilalle. Sillan ohjaus parantaa sähkön laatua ja mahdollistaa tehon verkkoon syötön tasasuuntaussillalla. Tyristorisillassa voidaan ohjata joko vain kolmea tai kaikkia kuutta tyristoria. Puoliohjatussa sillassa ohjatut tyristorit ovat kaikki joko suurimman arvon valitsimia tai pienimmän arvon valitsimia. Puoliohjattu silta vaatii vähemmän loistehoa syöttöverkolta ja sietää suurempia ohjauskulman arvoja kuin täysin ohjattu silta, mutta sillä ei voi syöttää tehoa verkkoon päin. Suuritehoisissa laitteissa kyseinen ominaisuus on monesti tärkeä, joten käsitellään ainoastaan täysin ohjattua tyristorisiltaa.

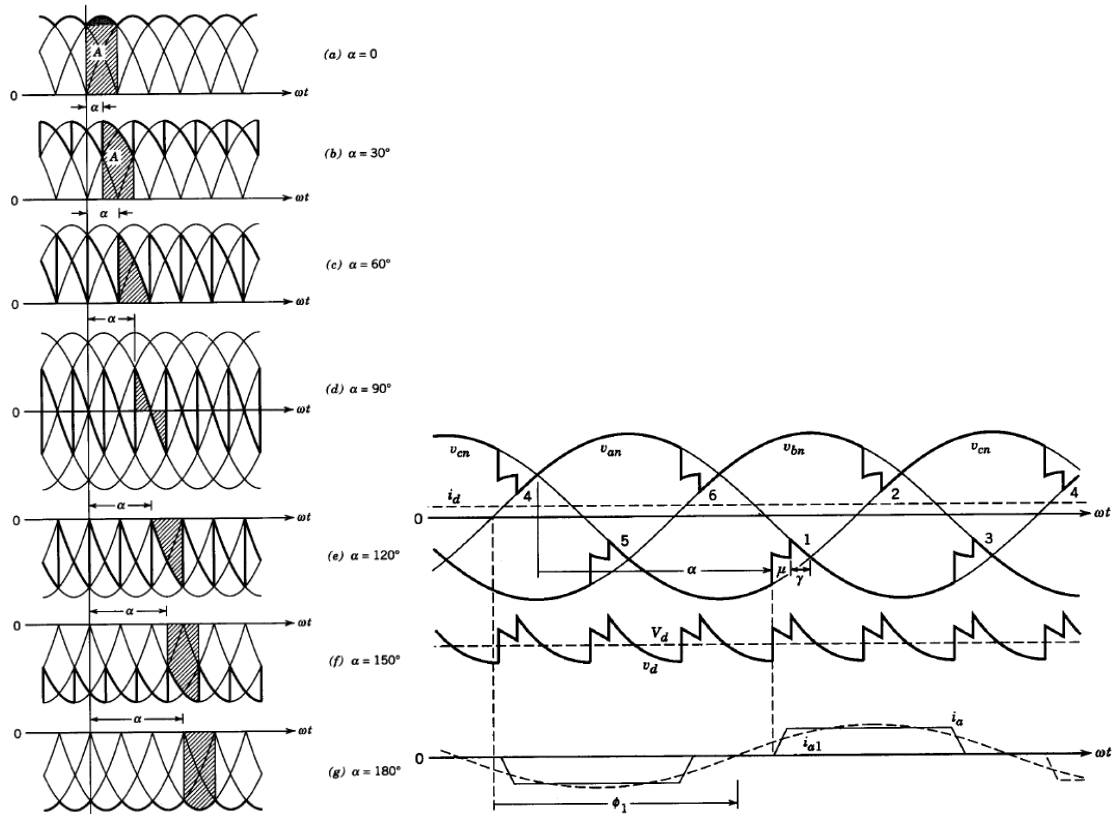
Tyristoreiden syttymiskulmaa muuttamalla saadaan säädettyä tasajännitteen suuruutta. Viivästäällä tyristoreiden syttymistä virran ja jännitteen välille muodostuu myös vaihesiirtoa. Tyristorisillan kytkentä ja toiminta on havainnollistettu kuvassa 29. Kuvassa verrataan sillan käyrämuotoja ohjauskulman ollessa $\alpha=0$ ja $0 < \alpha < 90^\circ$. Kuvan kohdassa b) on viivästetty tyristoreiden syttymistä ja havainnollistettu suurimman ja pienimmän jännitearvon valitsimien toimintaa. Tasasuunnattu jännite muodostuu kullakin hetkellä sillassa esiintyvien suurimman ja pienimmän jännitearvon erotuksesta, jotka ovat esitettyinä kuvassa paksulla viivalla. Kuvasta nähdään myös kommutoinnin kulku. Kuvan kohdassa a) numeroidut ajanhetket 1-6 ovat kommutointihetkiä. Ajanhetkellä 3 virta kommutoi tyristorilta T1 tyristorille T2. Kun sillan ohjauskulmaa lisätään, kommutointi ei voi tapahtua vastaavalla b-kohdan ajanhetkellä 7, sillä tyristori T2 ei syty vielä ohjauskulman vuoksi. Kommutointi tyristorille T2 tapahtuu tässä tapauksessa

vasta tyristorin syttyessä ajanhetkellä 8. Selvyyden vuoksi kuvassa on oletettu kommutointikulman olevan $\mu=0$.



Kuva 29. Diodi- ja tyristorisillan käyrämuotoja. a) Yläpuolella tasasuunnattu jännite sekä tasajännitteen keskiarvo kun ohjauskulma $\alpha = 0$. Alapuolella vaihejännitteet sekä yhden vaiheen virta samassa tilanteessa. b) Ohjauskulman vaikutus tyristorisillan jännitteen tasasuuntaukseen. c) Ohjauskulman $0 < \alpha < 90^\circ$ vaikutus virran vaihesiirtoon tyristorisillassa. d) Kuusipulssisella tyristorisillalla tasasuunnattu jännite sekä tasajännitteen keskiarvo, ohjauskulma $0 < \alpha < 90^\circ$. [14]

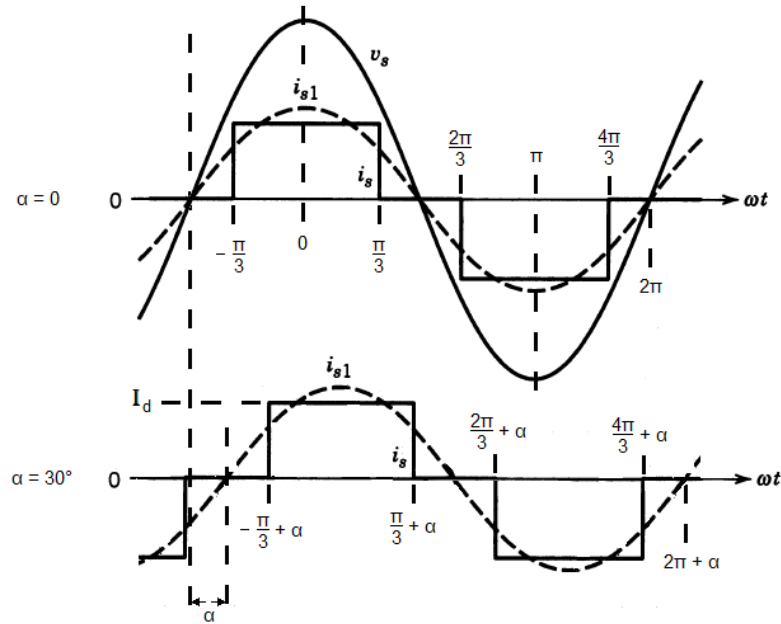
Tyristoritasasuuntaajalla pystytään syöttämään tehoa myös verkkoon päin lisäämällä ohjauskulman arvo välille $90^\circ < \alpha < 180^\circ$. Tällöin tasajännitteen keskiarvon polariteetti on negatiivinen ja tehon suunta on verkkoon päin. Kuvassa 30 on esitetty tasajännitteen muodostuminen eri ohjauskulman arvoilla. Kuvassa on myös tarkempi hahmotelma tyristorisillan toiminnasta vaihtosuuntaajana. Tähän kuvaan on merkitty ohjauskulma $90^\circ < \alpha < 180^\circ$, kommutointikulma μ sekä kommutoisvara $\gamma = 180^\circ - \alpha - \mu$. Tämä kommutoisvara on varotoimi sillan toiminnalle ja sen on oltava suurempi kuin tyristorin toipumisaika. Jos ohjauskulma on lähellä arvoa 180° ja tyristorin toipumisaikaa ei oteta huomioon, tyristorin syttyminen voi mennä yli 180° jolloin siltä kippaa josta seuraa ylivirta ja laitteisto voi rikkoutua. Tästä syystä kuvan 30 g-kohta ei ole realistinen käyttötilanne. Kommutoisvara voi olla esimerkiksi $\gamma = 18^\circ$, joka on 50 Hz verkossa aikana hieman alle 1 ms. Tämä riittää hitaimmillekin verkkokommutoiville tyristoreille, sillä niiden toipumisaikat ovat muutamien satojen mikrosekuntien luokkaa. [15] Kuvassa 30 on myös havainnollistettu, että vaihejännitteen ja vaihevirran välinen vaihesiirto on $90^\circ < \Phi_1 < 180^\circ$ tyristorisillan toimiessa vaihtosuuntaajana.



Kuva 30. Kohdissa a-c Tyristorisilta toimii tasasuuntaajana ja kohdissa e-g vaihtosuuntaajana. Kohdassa d tasajännitteen keskiarvo on nolla. Oikealla on havainnollistettu tyristorisillan toimintaa vaihtosuuntaajana. Ylimpänä jännitekäyrät ohjauskulmineen (α), kommutoimiskulmineen (μ) ja kommutoimisvaroineen (γ). Keskellä tasasuunnattu jännite v_d ja tasajännitteen keskiarvo $V_d < 0$. Alimpana vaiheen a virran käyrämuoto. Kuvassa esitettyä myös jännitteen ja virran välinen vaihesiirto Φ_1 . [14]

3.3 Verkkokommutoivan suuntaajan loisteho

Kun verkkokommutoivan tasasuuntaussillan ohjauskulma sekä kommutointikulma ovat nollia, verkkovirran perusaalto on samanvaiheinen jännitteen kanssa. Tällaisessa erikoistapauksessa suuntaaja ei kuluta loistehoa. Ohjauskulman lisääminen viivästää virtaa jännitteeseen nähden ohjauskulman verran ja ideaalitilanteessa vaihesiirtokulma on ohjauskulman suuruinen, jolloin suuntaaja kuluttaa loistehoa. Tällainen tilanne voidaan esittää matemaattisesti fourier-sarjan kertoimien avulla integroimalla kuvan 31 integrointirajojen avulla.



Kuva 31. Ylempänä ideaalitilanne ilman vaihesiirtoa ja alempana vaihesiirrolla $\alpha = 30^\circ$.

Fourier-sarja määritellään seuraavasti:

$$i(x) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{i_{pn} \cos(nx) + i_{qn} \sin(nx)\} \quad (3)$$

kertoimet i_{pn} ja i_{qn} ovat

$$[15] \quad i_{pn} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(x) \cos nx \, dx, \quad i_{qn} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(x) \sin nx \, dx \quad (4)$$

Alaindeksi P tarkoittaa kosinimuotoista pätötehoa ja alaindeksi Q tarkoittaa 90° pätötehoa jäljessä olevaa sinimuotoista komponenttia eli loistehoa. Tasavirtakomponentti I_0 lasketaan virran keskiarvosta, joka on tässä tapauksessa $I_0 = 0$. Kuvan 31 kulmien avulla saadaan laskettua perusaallon $n = 1$ komponenttien huippuarvot

$$\begin{aligned} i_{p1} &= \frac{1}{\pi} \left[\int_{-\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{\pi}{3}+\alpha} I_d \cos x \, dx - \int_{\frac{2\pi}{3}+\alpha}^{\frac{4\pi}{3}+\alpha} I_d \cos x \, dx \right] = \frac{I_d}{\pi} \left[\left| \frac{\pi}{3}+\alpha \right| \sin x - \left| \frac{4\pi}{3}+\alpha \right| \sin x \right] \\ &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \cos \alpha \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_{q1} &= \frac{1}{\pi} \left[\int_{-\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{\pi}{3}+\alpha} I_d \sin x \, dx - \int_{\frac{2\pi}{3}+\alpha}^{\frac{4\pi}{3}+\alpha} I_d \sin x \, dx \right] = \frac{I_d}{\pi} \left[-\left| \frac{\pi}{3}+\alpha \right| \cos x + \left| \frac{4\pi}{3}+\alpha \right| \cos x \right] \\ &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \sin \alpha \quad (6) \end{aligned}$$

Tuloksista 5 ja 6 nähdään, että ohjatun verkkokommutoivan tasasuuntaajan virralla on ohjauskulman suuruudesta riippuva 90° jännitettä jäljessä oleva komponentti. Suuntaaja kuluttaa tällöin loistehoa. Tuloksen perusteella voidaan kirjoittaa näennäis-, pätö- ja loistehojen yhtälöt. Kun otetaan huomioon vaihe- ja pääjännitteen suhde $U_s = \frac{U}{\sqrt{3}}$ sekä ohjaamattoman kuusipulssisen verkkokommutoivan tasasuuntaussillan tasajännitteen keskiarvon kaava [16] $U_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U$, saadaan

$$S_1 = 3U_s I_1 = 3U_s \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} I_d = U_{di} I_d \quad (7)$$

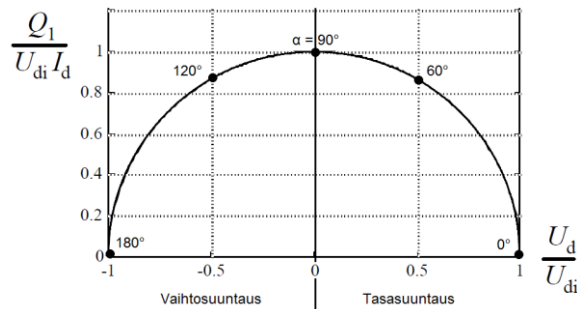
$$P_1 = 3U_s I_{P1} = 3U_s \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} I_d \cos \alpha = U_{di} I_d \cos \alpha \quad (8)$$

$$Q_1 = 3U_s I_{Q1} = 3U_s \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} I_d \sin \alpha = U_{di} I_d \sin \alpha \quad (9)$$

Perusaallon tehokertoimeksi saadaan

$$\cos \Phi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \cos \alpha. \quad (10)$$

Yhtälöitä 7,8 ja 9 tutkimalla huomataan, että loisteho kasvaa ohjauskulman funktiona ohjauskulman arvoon $\alpha = 90^\circ$, jolloin suuntaaja on verkon kannalta häviötön reaktanssi. Pätöteho taas pienenee ohjauskulman kasvaessa edellä mainitulla tavalla. Kun ohjauskulma kasvaa yli 90 asteen, alkaa suuntaaja syöttää pätötehoa verkkoon päin, mutta loistehon suunta pysyy samana aina ohjauskulman arvoon $\alpha = 180^\circ$ saakka, joka on teoreettinen maksimi ohjauskulmalle. Ohjauskulman vaikutusta loistehon kulutukseen on havainnollistettu kuvassa 32.



Kuva 32. Verkkokommutoivan suuntaajan loistehon kulutusta kuvaava ympyräkaari.

[15]

3.4 Kaksitasoinen pulssinleveysmodulaatio

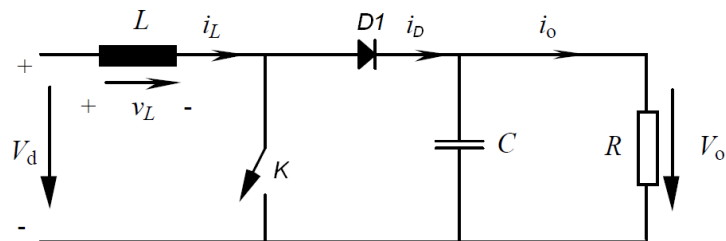
Verkkokommutoiva suuntaaja tuottaa sellaisenaan epäkäytännöllisen suuren määrän etenkin matalataajuisia jännitteen ja virran yliaaltoja verkkoon. Tämän vuoksi yliaaltoja täytyy vähentää erillisellä suodattimella. Verkkosuodattimen estokaista on järkevää viiritä niille taajuuksille, joita suuntaaja tuottaa eniten, eli kuusipulssisen verkkokommu-

toivan suuntaajan tapauksessa 5. ja 7. harmonisen yliaallon tasolle. Käytännön kuormilla sekä verkolla on luonnostaan induktanssia, joten ne toimivat valmiiksi alipäästösuodattimena. Tästä syystä suuritaajuiset yliaallot vaimenevat verkossa ja kuormassa luonnostaan paremmin kuin matalataajuiset yliaallot. Näin ollen matalataajuisien yliaaltojen vähentämisellä on suurempi merkitys sähkön laadun kannalta.[17] Pulssinleveysmodulaatiota(PWM) käyttävillä laitteilla on kytkentätaajuus satoja, jopa tuhansia hertsejä joten niiden tuottamat yliaallot keskittyvät ylemmille taajuuksille, kuin verkkokommutoivilla suuntaajilla vähentäen suodatuksen tarvetta verrattuna verkkokommutoiviin suuntaajiin. [17]

Pulssinleveysmodulaatio on mahdollista itsekommutoivilla kytkimillä, eli kytkimillä, jotka voidaan sytyttää ja sammuttaa ohjauspulsseilla milloin vain. Tästä ominaisuudesta johtuu pulssinleveysmoduloidun järjestelmän hyvä loistehon säätö sekä mahdollisuus siirtää tehoa taajuusmuuttajasta verkkoon päin. Seuraavaksi käsitellään pulssinleveysmoduloituja laitteita. Johdatus asiaan tehdään jännitettä nostavan tasasähkökatkojan kautta, josta edetään pulssinleveysmoduloiuihin verkkosuuntaajiin.

3.4.1 Jännitettä nostava tasasähkökatkoja

Pulssinleveysmodulaatio perustuu suuritaajuiseen virran katkomiseen, joka on mahdollista itsekommutoivilla kytkimillä. Näille järjestelmille ominaisia ovat palkkijonmuotoinen jännite ja sahalaitainen verkkovirtakäyrä. Pulssinleveysmodulointia käytetään taajuusmuuttajien lisäksi myös tasasähkökatkojissa. PWM-tasasuuntaussiltojen toimintaa voikin verrata suoraan jännitettä nostavan katkojan toimintaan sillä erolla, että syöttö on sinimuotoista vaihtojännitettä eikä tasajännitettä.[15] Kuvassa 33 on esitetty jännitettä nostavan katkojan eli boost-katkojan kytkentä.



Kuva 33. Jännitettä nostavan katkojan kytkentä.

Kuvassa esitetty kytkimen K kiinni -ja aukioloaikojen suhde ilmaistaan kytkimen suhteellisella johtoajalla

$$[18] D = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}}, (11)$$

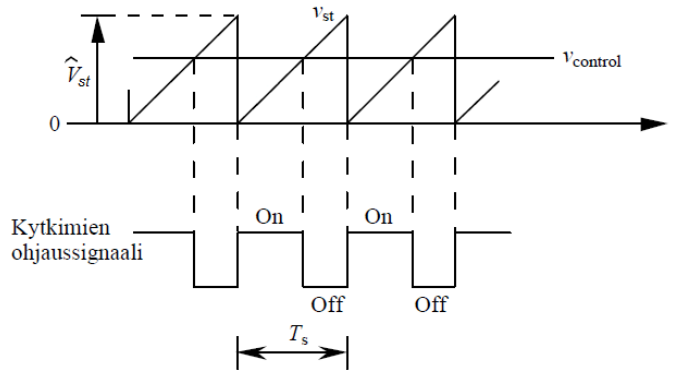
josta kytkentätaajuus on

$$[18] f_{sw} = \frac{1}{t_{ON} + t_{OFF}} = \frac{1}{T_s}. (12)$$

Jännitettä nostavan katkojan tulo- ja lähtöjännitteiden suhde voidaan ilmaista kytkimen suhteellisen johtoajan avulla.

$$[18] \frac{V_o}{V_d} = \frac{I_d}{I_o} = \frac{T_s}{t_{OFF}} = \frac{1}{1-D} \quad (13)$$

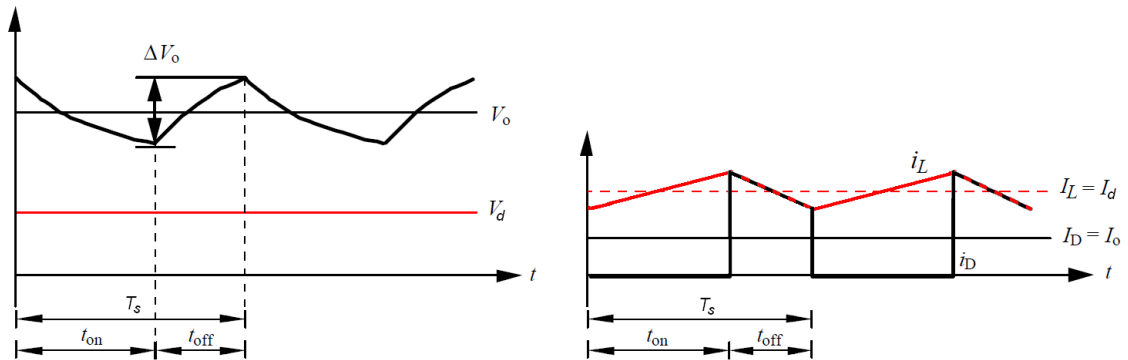
Kytkimen suhteellisen johtoajan pituutta voidaan hallita esimerkiksi vertaamalla referenssisajännitettä $v_{control}$ generoituun saha-aaltoon v_{st} . Kytkimen suhteellista johtoajan pituus muuttuu, kun referenssijännitteen tasoa muutetaan suhteessa saha-aaltoon. Kuvassa 34 on kuvattu jännitteiden vertaaminen ja kytkimen ohjaus. Kytkin on kiinni, kun $v_{control} > v_{st}$ ja auki, kun $v_{control} < v_{st}$.



Kuva 34. Kytkimen ohjaaminen vertaamalla tasajännitettä saha-aaltoon. [18]

Kun Kytkin K on kiinni, virta kulkee ainoastaan kytkimen ja induktanssin L läpi ja virta kasvaa Kirchhoffin virtalain [16] $u = L \frac{di}{dt}$ (14) mukaan induktanssin yli olevan jännitteen v_L funktiona, joka on tulojännitteen V_d suuruinen. Virta kulkee vain kytkimen ja induktanssin läpi, koska boost-katkojan toiminta vaatii lähtöön suuremman jännitteen, kuin tuloon. Muuten diodi D1 johtaisi koko ajan.[18] Kun kytkin avataan, virta kulkee diodin D1 läpi kondensaattoriin ja kuormaan. Induktanssin L yli oleva jännite on tällöin $v_L = V_d - V_o$. Koska lähtöjännite V_o on suurempi kuin tulojännite V_d , induktanssin yli oleva jännite v_L on negatiivinen ja sen läpi kulkeva virta pienenee jännitteen funktiona. Kun tätä sykliä toistetaan, tuloon muodostuu sahalaitainen virta i_L , jolla on positiivinen keskiarvo $I_L = I_d$.

Lähdössä virta ei ole samanmuotoista kuin tulossa, sillä kun kytkin K on kiinni, virtaa ei kulje lähtöön päin lainkaan. Kytkimen ollessa auki lähtöön päin kulkee sama virta kuin induktanssin L läpi, joka kulkee edelleen kondensaattorille C ja kuormalle R. Koska virta on pulssimuotoista, kondensaattori C latautuu ja purkautuu vuorotellen ja kondensaattorin jännitteeseen muodostuu jaksollista vaihtelua, joka on saman suuruinen kuin lähtöjännitteen vaihtelu ΔV_o . Lähtöjännite eli kondensaattorin jännite muodostuu kytkimen suhteellisesta johtoajasta D riippuen suuremmaksi, kuin tulojännite V_d Kirchhoffin jännitelain [16] $i = C \frac{du}{dt}$ (15) mukaan. Kondensaattorin jaksollinen latautuminen ja purkautuminen tasoittaa lähdön virtaa, joka on ideaalitapauksessa täysin tasaista. Voidaan sanoa, että jatkuvalla alueella toimittaessa, jolloin induktanssin virta ei aukotu, lähtövirran vaihtokomponentti kulkee kondensaattorin kautta eikä sitä näy lähdössä. [18] Lähdön virta lasketaan diodin D1 läpi kulkevan virran i_D keskiarvosta, jolloin saadaan tasavirta $I_D = I_o$. Jännitettä nostavan katkojan jännitteitä ja virtoja on hahmoteltu kuvaan 35.



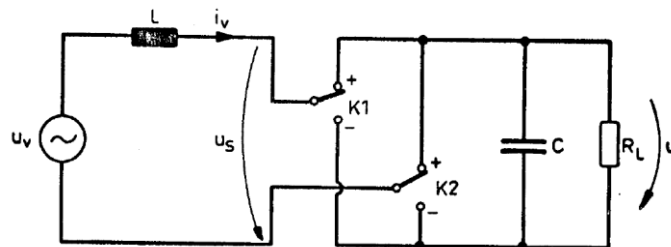
Kuva 35. Jännitettä nostavalle katkojalle ominaisia käyrämuotoja. Punaisella viivalla tulon suuret tasajännite V_d , induktanssin virta, joka on samalla tulovirta i_L ja sen keskiarvo $I_L = I_d$. Mustalla viivalla lähdön suuret lähtöjännitteen keskiarvo V_o ja sen vaihtelu ΔV_o , diodin virta i_D ja kondensaattorin tasoittama lähtövirta $I_D = I_o$. Kuvassa myös esitetty kytkimen kiinni(on)- ja aukiolojaksot(off). Muokattu lähteestä [18].

KytKentätaajuuden suuruus ei vaikuta lähtöjännitteen keskiarvoon, mutta suurempi kytKentätaajuus pienentää lähdön jännitteen ja virran sykkeisyyttä. Lähtöjännitteen ja -virran laadun kannalta kytKentätaajuus tulee olla mahdollisimman suuri. Käytännössä kytkimessä kuitenkin esiintyy kytKentähäviöitä, jotka lisääntyvät kytKentätaajuuden kasvaessa. KytKentätaajuus onkin kompromissi sähkön laadun ja häviöiden välillä. Silti kytKentätaajuus on tasasähkökatkoissa varsin korkea, 20 kHz - n. 500 kHz. [18]

3.4.2 Yksivaiheiset pulssinleveysmoduloidut verkkosuuntaajat

Jotta jännitettä nostavan katkojan periaatetta voi soveltaa PWM-tasasuuntaajaan, täytyy kytKentää muokata. Boost-katkojan kytkin ja diodi korvataan kahdella kaksinapaisella vaihtokytkimellä K1 ja K2. Kun lisäksi syöttö vaihdetaan vaihtojännitteeksi, saadaan kuvan 36 mukainen laitteiston periaatekytkentä. KytKennällä voidaan valita kolme kytKentätilaa seuraavasti:

1. $u_s = +U_d$: K1+, K2 –
2. $u_s = 0$: K1+, K2 + tai K1–, K2 –
3. $u_s = -U_d$: K1–, K2 + [19]

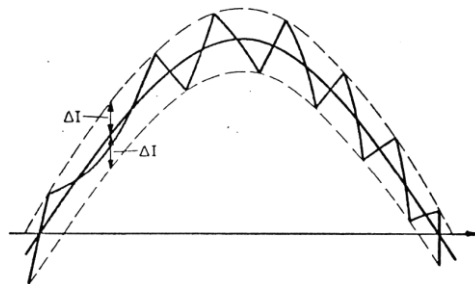


Kuva 36. Yksivaiheinen jännitevälipiirillisen verkkosuuntaajan periaatteellinen kytKentä. [19]

KytKentätaajuus on PWM-verkkosilloilla moninkertainen verrattuna verkkotaajuuteen, tosin matalampi kuin tasasähkökatkoilla. Nopeasta kytKentätaajuudesta johtuen voidaan toteuttaa laite, joka saa aikaan sinimuotoiset jännitteen ja virran perusaallot esimerkiksi tasajännitteestä. Tällöin on kyse vaihtosuuntauksesta. Tasasuuntauksessa

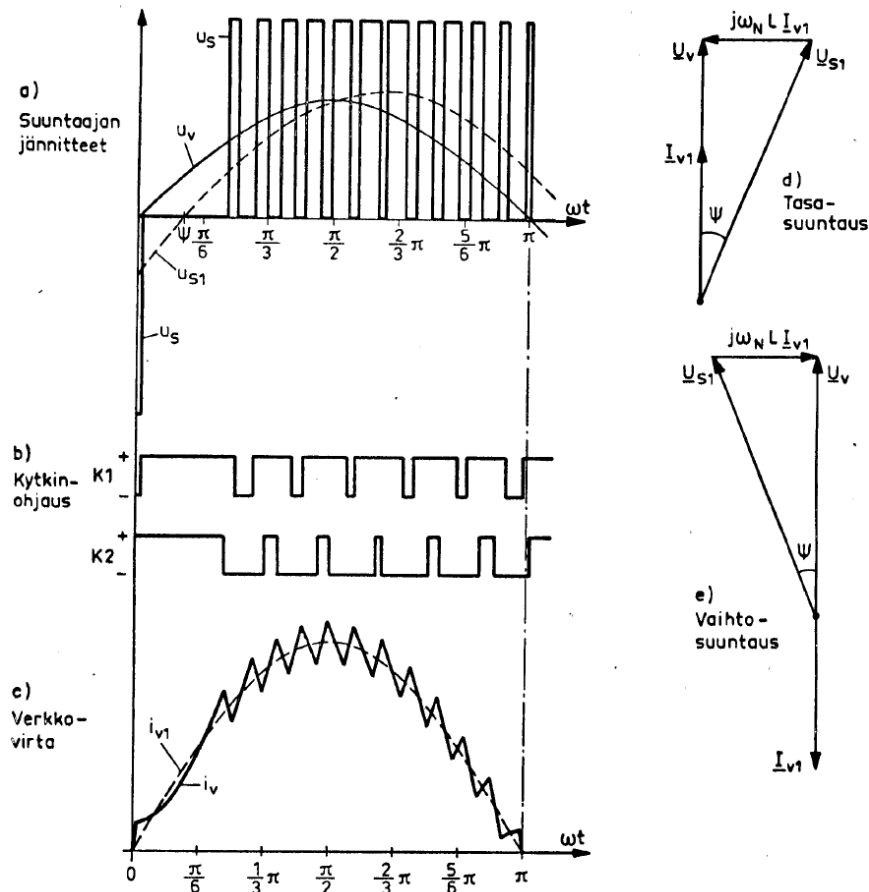
muutetaan vaihtojännite ja -virta tasaisiksi. Tämä onnistuu myös verkkokommutoivilla laitteilla, mutta PWM-verkkosilloilla saadaan tasasuuntaus suoritettua vähemmällä yliaaltotuotannolla ja samalla laitteella saadaan myös suunnattua tehoa verkkoon päin, jälleen pienemmällä yliaaltopitoisuudella kuin verkkokommutoivilla silloilla.

Seuraavaksi esitellään suuntaajan toimintaa yksinkertaisella virran kaksipistesäädöllä, jonka periaate on esitetty kuvassa 37. Kaksipistesäätöön perustuvassa ohjauksessa verkon virtaa verrataan verkkojännitteen kanssa samassa vaiheessa olevaan siniaaltoon, jonka amplitudi pidetään vakiona. Jos verkkovirta poikkeaa ohjearvostaan enemmän kuin kuvassa esitetyn ΔI :n verran, kytkimien K1 ja K2 asentoa muutetaan siten, että virta alkaa lähestyä ohjearvoa. Verkkovirran arvo pysyy siis koko ajan $\pm \Delta I$ sisällä ohjearvostaan.[19]



Kuva 37. Virran kaksipistesäädön periaate. [19]

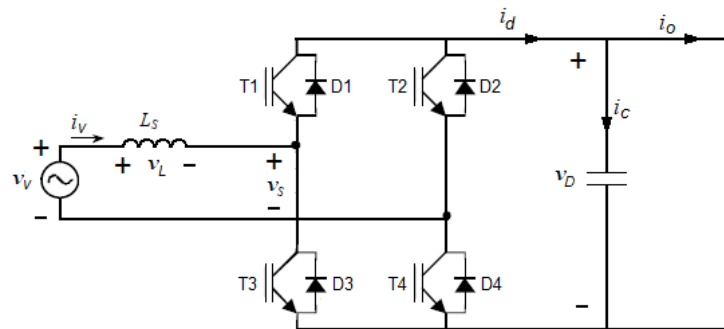
Jännitevälipiirillisen verkkosuuntaajan toiminnan ehtona on välipiirin jännitteen suuruus, joka tulee olla suurempi kuin verkon vaihtojännitteen huippuarvo eli $U_d > \sqrt{2}U_v$. [15] Välipiirin tasajännitettä pidetään vakiona, vaikka verkon jännite vaihtelisi. Kun laite on toiminnassa ja kytkimiä K1 ja K2 käännellään, suuntaajan tulossa näkyy palkkimuotoinen katkottu välipiirin jännite, jolla on sinimuotoinen perusaalto. Tämän perusaallon vaihetta voidaan hallita vapaasti sillan ohjauksella. Kuvassa 38 on selvitetty yksivaiheisen pulssinleveysmoduloidun verkkosuuntaajan toimintaa. Kuvan 38 kohdat a-d kuvaavat suuntaajan toimintaa tasasuuntauksessa, ja e-kohta vaihtosuuntauksessa. Kuvan d-kohdan vektoridiagrammista nähdään, että suuntaajan jännite tulee olla vaihesiirtokulman Ψ verran verkon jännitettä jäljessä, jotta perusaaltoista loistehoa ei kulutettaisi eikä tuotettaisi. Saman kuvan e-kohdan vektoridiagrammissa on esitetty sama asia vaihtosuuntauksessa. Kuvan e-kohdasta nähdään myös, että vaihtosuuntauksessa virran vaihe käännetään 180° sekä verkkojännitteen ja suuntaajan jännitteen välinen vaihesiirtokulma Ψ säilyy samana, mutta suuntaajan jännite on verkon jännitettä edellä.



Kuva 38. Virran kaksipistesäädöllä toteutetun yksivaiheisen PWM-verkkosuuntaajan toimintaa. a) Verkkojännite U_v , palkkimuotoinen suuntaajan tulon jännite u_s ja suuntaajan tulon jännitteen perusaalto u_{s1} , joka on kulman Ψ verran verkkojännitettä jäljessä, b) kytkimien K1 ja K2 ohjaus välipiirin kiskoihin DC+ ja DC-, c) verkkovirran i_v ja sen perusaallon i_{v1} käyrämuodot, d) Suuntaajan vektoridiagrammi tasasuuntaustoiminnassa ja e) Suuntaajan toiminta vaihtosuuntauksessa, kun $\cos \varphi = 1$. [19]

Kuvan 36 laite on vain periaatteellinen ja käytännön laitteet toteutetaan eri tavalla. Laitteissa käytetään itsekommutoivia puolijohdekytkimiä ja niiden rinnalla vastasuuntaan kytkettyä diodia. Yhtä vaihtokytkintä vastaa kaksi kytkin-diodi-paria. Käytännön laitteen kytkentä on esitetty kuvassa 39. Vaihtokytkimillä K1 ja K2 on kummallakin kaksi mahdollista tilaa ja kuvan 39 puolijohdekytkinten kytkentäsekvenssi tulee suunnitella siten, että se vastaa vaihtokytkinten toimintaa. Diodien päästösuunta on kuvassa ylöspäin. Koska välipiirissä on suurempi jännite kuin verkkojännitteen huippujännite, diodit eivät johda hallitsemattomasti laitteen toimiessa. Puolijohdekytkinten päästösuunta on taas kuvassa alaspäin, ja näitä kytkimiä ohjaamalla saadaan aikaan haluttu toiminnallisuus.

Vaihtokytkintä K1 vastaavat kuvan 39 puolijohdekytkimet T1 ja T3 sekä diodit D1 ja D3 ja vaihtokytkintä K2 vastaavasti puolijohdekytkimet T2 ja T4 sekä diodit D2 ja D4. Kummallekin verkkovirran puolijaksolle tulee muodostaa omat kytkentäsekvenssit kytkinkohtaisesti. Taulukkoon 13 on koottu tiedot siitä, mikä puolijohde johtaa riippuen vaihtokytkinten K1 ja K2 asennosta sekä verkkovirran polariteetista.



Kuva 39. Yksivaiheisen PWM-verkkosuuntaajan toteutus itsekommutoivilla puolijohdekytkimillä ja diodeilla.

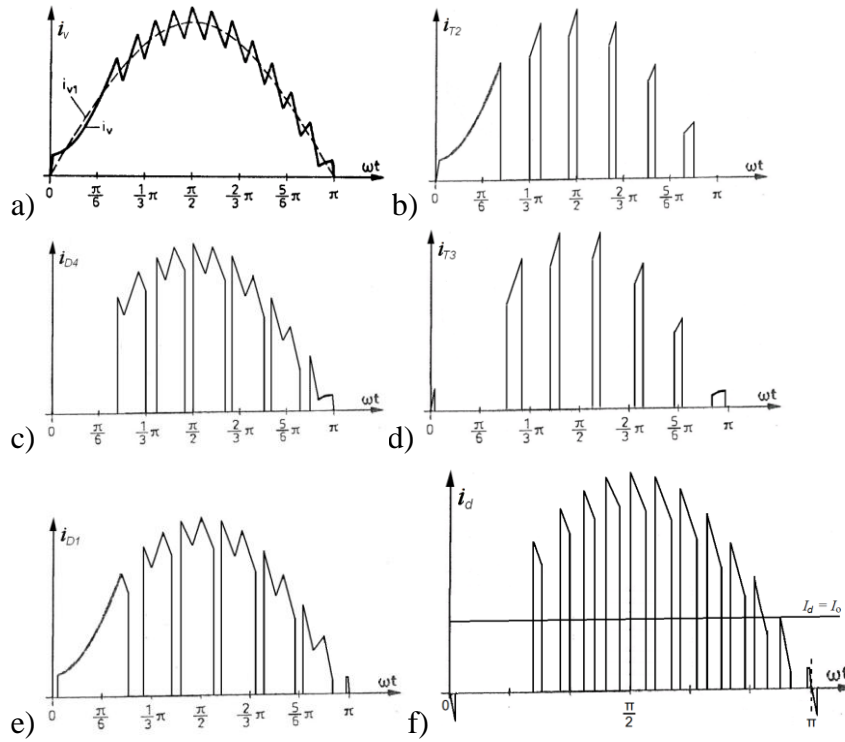
Taulukko 13. Vaihtokytkinten asentoa ja verkkovirran polariteettia vastaavat virran kulkutiet käytännön verkkosuuntaajassa.

		Vaihtokytkin ja sen asento			
		K1		K2	
		+	-	+	-
Verkkovirran i_v polariteetti	+	D1	T3	T2	D4
	-	T1	D3	D2	T4
		Johtava puolijohde			

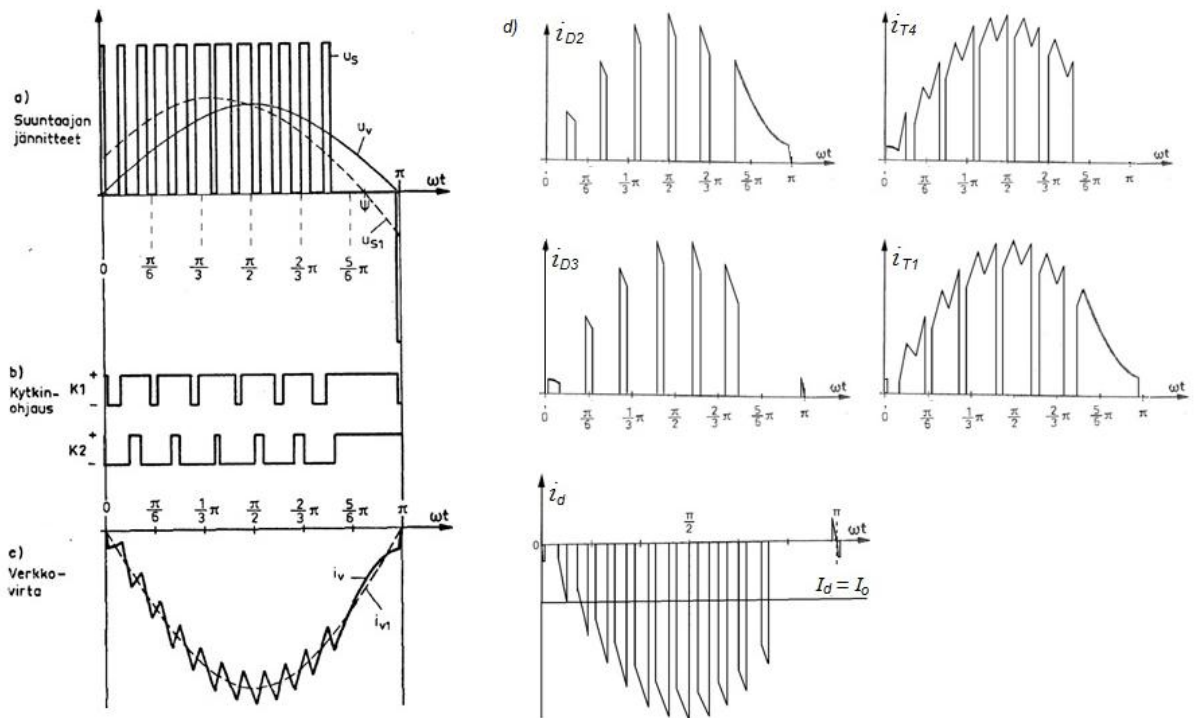
Näiden tietojen perusteella voidaan piirtää kullekin puolijohdeelle omat virtojen käyrämuodot sekä hahmotella välipiirin virtoja. Kuvaan 40 on piirretty kuvassa 38 kuvatus verkkovirran puolijakso kuvan 39 kytkennällä puolijohdekohtaisesti, kun piiri toimii tasasuuntaajana. Lisäksi kuvaan on piirretty tasajännitepiiriin virta i_d ennen kondensaattoria sekä tasavirta i_o . Kuvasta näkee analogian jännitettä nostavaan tasasähkökatkojaan. Kun esimerkiksi puolijohdekytkin T2 kytetään kiinni ja verkkovirta on positiivinen, virta kulkee suoraan diodin D1 ja kytkimen T2 kautta oikosulkien verkon ja virta kasvaa induktanssin L_s ja sen yli olevan jännitteen $v_L = v_v * \sin(\omega t)$ funktiona. Kun kytkin T2 aukaistaan, virta kommutoituu diodille D4 ja virta kulkee välipiiriin. Tällöin virta pienenee kuten jännitettä nostavan tasajännitekatkojankin tapauksessa, eli riippuen induktanssista L_s ja sen yli olevan jännitteestä $v_L = v_v * \sin(\omega t) - v_d$. Tämän jälkeen puolijohdekytkin T3 suljetaan ja virta kulkee kytkimen ja diodin D4 kautta jälleen oikosulkien verkon, jolloin virta kasvaa jälleen kuten edellä on kuvattu. Näin järjestelmälle ominaiset palkkimuotoinen jännite ja sahalaitainen verkkovirran käyrämuoto syntyvät. Positiivisen verkkovirran puolijakson aikana tasavirrassa näkyy myös negatiivinen piikki, joka johtuu virran kaksipistesäädöllä toteutetusta ohjauksesta, kun puolijohdekytkimet T2 ja T3 johtavat samanaikaisesti.

Kun toimitaan vaihtosuuntauksessa, verkkovirran vaihetta käännetään 180° ja virta kulkee välipiirissä verkon suuntaan. Välipiirin tasajännitteen polariteetti pysyy samana. Koska välipiirissä on suurempi jännite kuin verkossa esiintyvät jännitteet, virran kulkiessa välipiiristä verkkoon se käyttää puolijohdekytkimiä. Tämä vastaa sahalaitaisen virran vaihtelun nousevaa osaa. Vastaavasti virran laskevan osan aikana virta ei kulje välipiiristä verkkoon, vaan verkko oikosuljetaan yhden puolijohdekytkimen ja yhden diodin kautta. Koska virran polariteetti on tällöin päinvastainen jännitteeseen verrattuna, virta pienenee eikä kasva kuten tasasuuntauksessa toimittaessa. Verkkosuuntaajan toimiessa vaihtosuuntaajana, tuotettavan vaihtojännitteen suurin arvo tulee olla pienempi kuin välipiirin tasajännite. Vaihtosuuntaajan toiminta voidaankin rinnastaa jännitettä laske-

van tasasähkökatkojen toimintaan toisin kuin tasasuuntaajan tapauksessa [20]. Suuntaajan toimintaa vaihtosuuntauksessa on havainnollistettu kuvassa 41.



Kuva 40. Yksivaiheisen PWM-verkkosillan virtojen käyrämuotoja yhden verkkovirran puolijakson aikana toteutettuna kuvan 39 mukaisella laitteistolla, kun se toimii tasasuuntaajana. a) Verkkovirta, b) Puolijohdekytkimen T2 virta, c) Diodin D4 virta, d) Puolijohdekytkimen T3 virta, e) Diodin D1 virta sekä f) Välipiirin suodattamaton tasavirta i_d ja tasoittunut tasavirta $I_d = I_o$. [21]



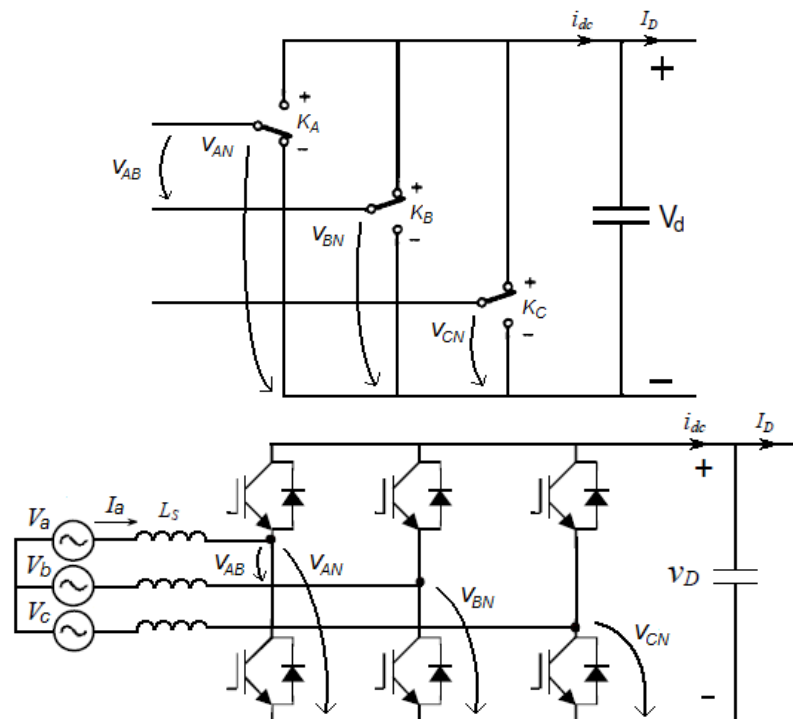
Kuva 41. Yksivaiheisen PWM-verkkosuuntaajan toimintaa, kun se toimii vaihtosuuntaajana. a) Verkkojännite U_v , suuntaajan tulon jännite u_s ja suuntaajan tulon jännitteen perusaalto u_{s1} , joka on kulman Ψ verran verkkojännitettä edellä, b) kytkimien K1 ja K2 ohjaus välipiiriin kiskoihin DC+ ja DC-, c) verkkovirran i_v ja sen perusaallon i_{v1} käyrämuodot sekä d) puolijakson aikana aktiivisten puolijohteiden virrat ja välipiiriin suodatetun tasavirta i_d ja tasoittunut tasavirta $I_d = I_o$. [21]

Pulssinleveysmoduloidut verkkosuuntaajat käyvät suuntaajaksi myös moottoreille ja generaattoreille eli taajuusmuuttaja voi koostua välipiiristä sekä kahdesta samanlaisesta suuntaajasta, joista toinen on kytketty verkkoon ja toinen moottoriin tai generaattoriin. Suuntaajan toiminta on samankaltaista sekä verkon että moottorin puolella. Suurin oleellinen ero on tehon suunta suuntaajassa. Tämän takia kytkentälogiikka muuttuu samankaltaisesti kuin verkkosuuntaajan tehon suunnan vaihtuessa. Pulssinleveysmodulointia käyttävistä taajuusmuuttajista voidaan tehdä myös neljässä tehokvadrantissa toimivia. Tämä tarkoittaa, että niillä voidaan tuottaa tai kuluttaa pätö- tai loistehoa vapaasti toisistaan riippumatta virran vaihekulmaa muuttamalla, kun verkkokommutioivilla silloilla voidaan ainoastaan kuluttaa loistehoa, vaikka pätötehoa voidaanakin liikuttaa kahden suuntaan. Neljässä tehokvadrantissa toimivia laitteita kutsutaan 4Q-käyttöiksi. Tällaiset taajuusmuuttajat sopivat moottorikäyttöille, joiden pitää saada siirtää tehoa verkkoon jarruttaessaan eli toimia generaattorina.

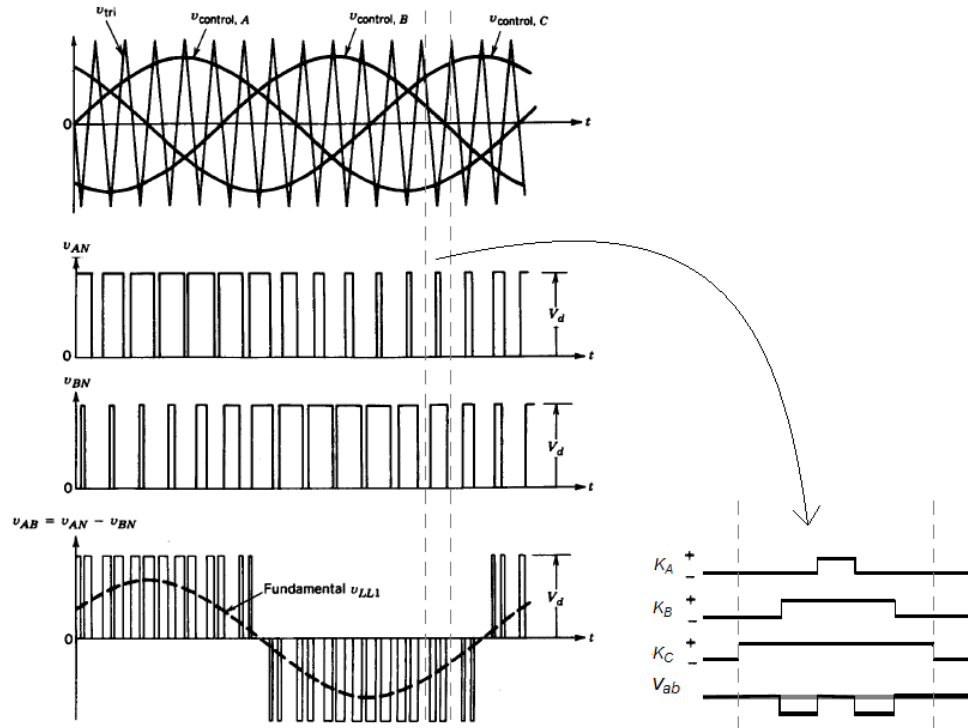
3.4.3 Kolmivaiheiset pulssinleveysmoduloidut verkkosuuntaajat

Yksivaiheisesta PWM-verkkosillasta saadaan kolmivaiheinen, kun lisätään kytkentään vielä yksi vaihtokytkin, joka käytännön laitteessa tarkoittaa kahta puolijohdekytkindiodi-paria. Kolmivaiheisella suuntaajalla pystyy säätää tehoa kaikissa neljässä kvadrantissa sekä muuttaa virran vaihekulmaa vapaasti, kuten yksivaiheisella suuntaajalla.

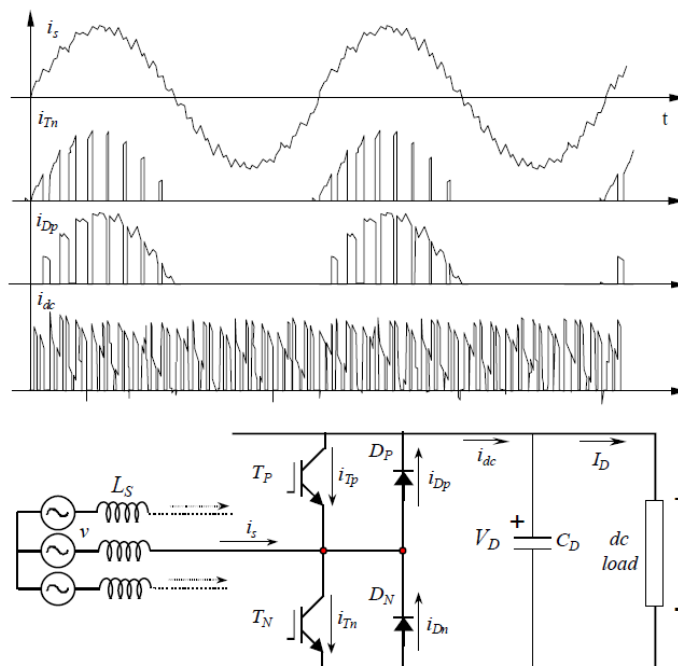
Välipiirin jännitteen tulee myös olla suurempi kuin verkkojännitteen suurin hetkellisarvo, aivan kuten yksivaiheisella suuntaajalla. Kuvassa 42 on kolmivaihesuuntaajan periaatteellinen vaihtokytkinkytkentä sekä käytännön suuntaaja toteutettuna puolijohdekytkimillä ja diodeilla. Kolmivaiheisen pulssinleveysmoduloidun verkkosillan ohjaamiseen voidaan käyttää esimerkiksi sini-kolmiovertailua. Tällöin kytkinohjeet luodaan vertaamalla kytkentätaajuaista kolmioaaltota verkkoataajuiseen siniaaltoon. Kytkentälogiikka voidaan valita esimerkiksi siten, että kun verkon siniaallon hetkellisarvo on suurempi kuin kolmioaallon hetkellisarvo, vaiheen vaihtokytkin on asennossa "+". Vastaavasti kun siniaallon hetkellisarvo on pienempi kuin kolmioaallon hetkellisarvo, vaihtokytkin on asennossa "-". Nämä kytkinohjeet tulee muokata käytännön laitteen puolijohdekytkimille vastaamaan periaatekytkennän vaihtokytkimiä kuten yksivaiheisen verkkosuuntaajan tapauksessa. Sini-kolmiovertailua selventää kuva 43, jossa on tarkennettu osa kytkentäsekvenssiä. Tarkennuksesta pystyy seuraamaan kytkinsignaaleiden muodostumista. C-vaiheen sinireferenssin arvo ylittää ensimmäisenä kolmioaallon arvon, ja alittaa viimeisenä. Näin ollen c-vaiheen vaihtokytkimellä on pisin aika asennossa "+". Vastaavasti a-vaiheen sinireferenssin arvo ylittää viimeisenä ja alittaa ensimmäisenä kolmioaallon arvon, joten sille tulee lyhin aika asennossa "+". Näillekin vaihtokytkimien ohjauksille tulee luoda vastineet, jotka takaavat puolijohdekytkimiä käyttävälle käytännön laitteelle saman toiminnan. Kuvassa 44 on yhden vaiheen puolijohteiden virtojen käyrämuotoja sekä välipiirin tasavirran muoto.



Kuva 42. Kolmivaiheisen PWM-verkkosillan periaatekytkentä sekä käytännön kytkentä.

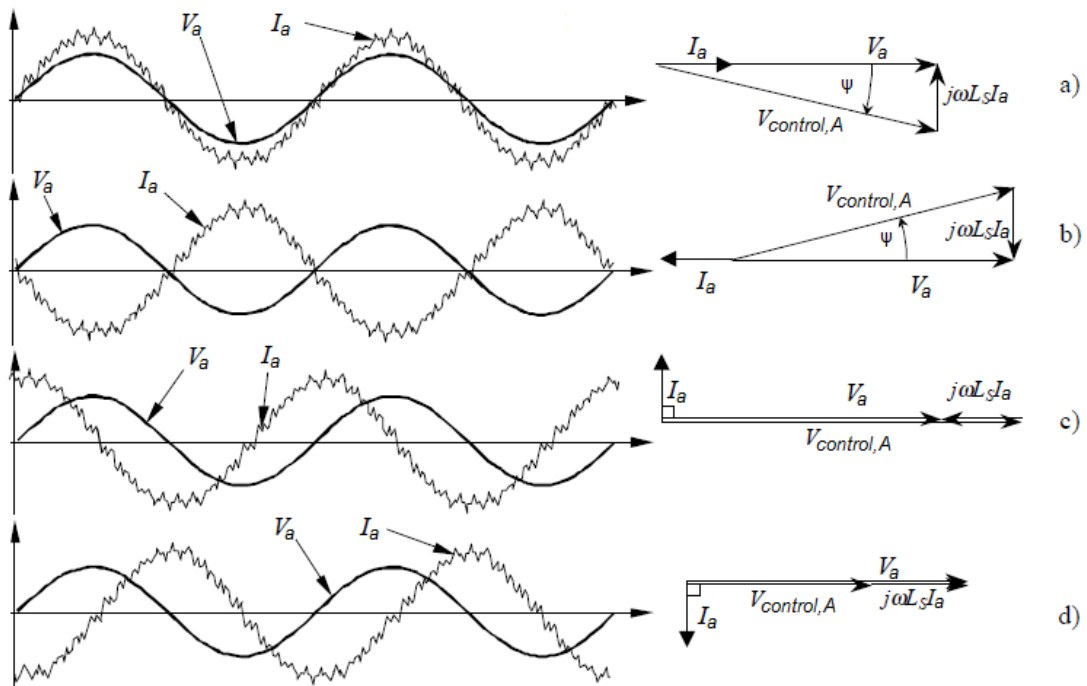


Kuva 43. Sini-kolmiovertailua kolmivaiheisessa PWM-verkkosuuntaajassa. Vasemmal-
la puolella yllimpänä vertailtavat aaltomuodot, keskellä kahden vaiheen tulojen jännit-
teet ja alimpana pääjännite v_{AB} , oikealla suurennos ja vaihtokytkinten ohjaus lyhyestä
osasta kytkentäsekvenssiä. [14]



Kuva 44. Kolmivaiheisen PWM-verkkosuuntaajan yhden vaiheen puolijohteiden virto-
ja. Virran positiivisella puolijaksolla johtavat kuvan mukaisesti kytkin T_n ja diodi D_p .
Negatiivisella puolijaksolla taas johtavat kytkin T_p ja diodi D_n . Alimpana käyrämuotona
on kolmivaiheisen PWM-verkkosuuntaajan välipiirin suodattamaton tasavirta, jolla on
positiivinen keskiarvo. [22]

Tarkan vaihekulmasäädön ansiosta pulssinleveysmoduloiduilla suuntaajilla pystytään hallitsemaan loistehon tuottoa ja kulutusta. Suuntaajilla voidaan myös tuottaa tai kuluttaa loistehoa, vaikka pätötehoa ei tuotettaisi. Näitä laitteita voidaan käyttää sähköverkoissa loistehon kompensointiin. Tämä pienentää verkon kuormaa, koska siirrettävä loisteho ei kuormita verkkoa. Myös verkon jännitteitä pystytään säätämään paikallisesti loistehon tuotannolla ja kulutuksella. Jos verkon solmupisteessä jännite on liian matala, verkkosuuntaajalla voidaan tuottaa tuohon pisteeseen loistehoa, joka nostaa solmupisteen jännitettä. Vastaavasti jos esimerkiksi pitkän siirtojohdon päässä jännite on liian korkea niin vaihtelevasti, ettei johdon päähän kannata asentaa kiinteitä reaktoreita, voidaan käyttää verkkosuuntaajaa reaaliaikaiseen loistehon kulutuksen säätöön. Näin saadaan halutessa laskettua jännitettä johdon päässä. Kuvassa 45 on esitetty, miten suuntaajan loistehoa hallitaan. Suuntaajan ja verkon jännitteiden välillä tulee olla pieni vaihe- siirto, kuten yksivaiheisillakin laitteilla, jotta loistehoa ei siirrettäisi eli $\cos \varphi = 1$. Kuvassa on myös tilanteet, joissa suuntaaja ei siirrä lainkaan pätötehoa, mutta tuottaa ja kuluttaa loistehoa. $V_{\text{control},A}$ vastaa kuvan 43 modulointiaaltoja, jonka vaihetta säädetään suuntaajassa eri tehonsiirtotilanteiden saavuttamiseksi.

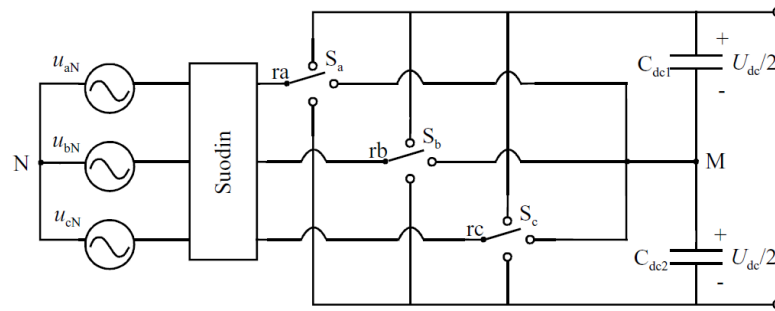


Kuva 45. Suuntaajan jännite- ja virtakäyriä sekä vektordiagrammit eri toimintatilanteissa. a) Tasasuuntaaja, $\cos \varphi = 1$, b) vaihtosuuntaaja, $\cos \varphi = 1$, c) Toiminta kondensaattorina eli tuotetaan loistehoa, $\cos \varphi = 0$ ja d) Toiminta reaktorina eli kulutetaan loistehoa, $\cos \varphi = 0$. [22]

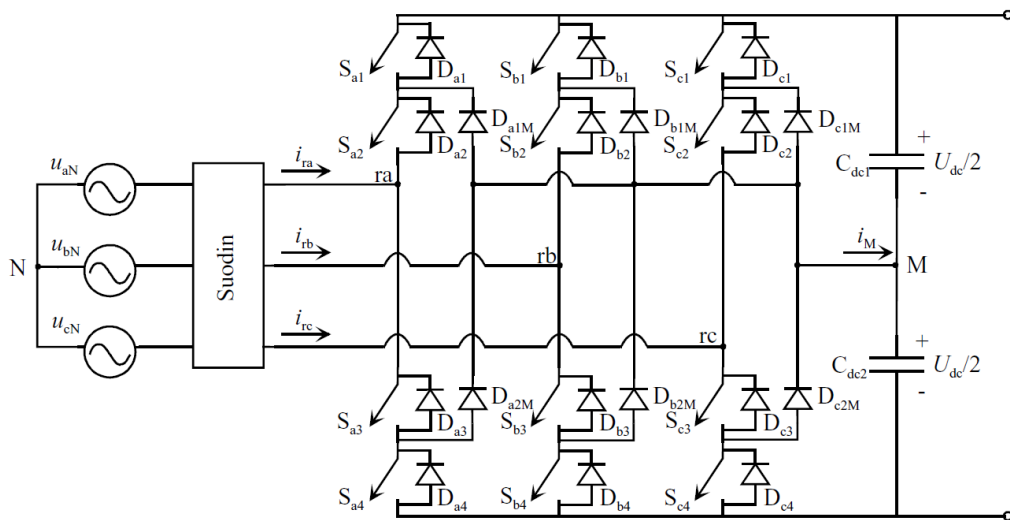
3.5 Kolmitasoiset pulssinleveysmoduloidut verkkosuuntaajat

Kolmitasoisessa taajuusmuuttajassa on jännitevälipiirissä kolme jännitetasoa eli yksi taso enemmän kuin kaksitasoisessa. Kun näitä kolmea tasoa kytketään vaiheisiin oikealla tavalla, päästään parempaan sähkön laatuun kuin kaksitasoisilla laitteilla samalla kytkentätaajuudella[23]. Toisaalta kolmitasoisissa laitteissa on enemmän puolijohteita sekä niiden ohjaaminen on monimutkaisempaa, joten kolmitasoisien laitteiden hinta on kor-

keampi. Tästä syystä kolmitasoisia laitteita on kannattavaa käyttää lähinnä suuritehoisissa keskijännitelaitteissa. Kun kaksitasoisen PWM-suuntaajan periaatekytkentä koostui kolmesta kaksiasentoisesta vaihtokytkimestä, kolmitasoisen PWM-suuntaajan periaatekytkennässä on kolme kolmiasentoista vaihtokytkintä $S_{(a,b,c)}$, jotka kytkevät välipiirin potentiaaleja DC+(positiivinen kisko), NP(nollapotentiaali, kuvissa piste M) ja DC-(negatiivinen kisko) vaiheisiin. Kolmitasoisen suuntaajan periaatteellinen kytkentä on esitetty kuvassa 46. Vastaavasti käytännön kytkentä on kuvassa 47. Vaihtokytkinten yläasentoa vastaavat verkkovirran polariteetista riippuen puolijohdekytkimet $S_{(a,b,c)1}$ sekä $S_{(a,b,c)2}$ tai diodit $D_{(a,b,c)1}$ ja $D_{(a,b,c)2}$. Nämä kytkevät potentiaalın DC+ esimerkiksi a-vaiheeseen siten, että joko kytkimet S_{a1} ja S_{a2} tai diodit D_{a1} ja D_{a2} johtavat samanaikaisesti. Vaihtokytkinten ala-asentoa vastaavat taas samalla logiikalla puolijohdekytkimet $S_{(a,b,c)3}$ sekä $S_{(a,b,c)4}$ tai diodit $D_{(a,b,c)3}$ ja $D_{(a,b,c)4}$. Tällöin välipiirin potentiaali DC- kytetään vaiheeseen. Vaihtokytkinten väliasentoa taas vastaavat puolijohdekytkimet $S_{(a,b,c)2}$ ja $S_{(a,b,c)3}$ sekä diodit $D_{(a,b,c)1M}$ ja $D_{(a,b,c)2M}$. Tällöin välipiirin nollapotentiaali kytetään esimerkiksi vaiheeseen a kytkimen S_{a3} ja diodin D_{a2M} kautta verkkovirran polariteetin ollessa positiivinen ja kytkimen S_{a2} ja diodin D_{a1M} kautta verkkovirran polariteetin ollessa negatiivinen. [24]



Kuva 46. Kolmitasoisen kolmivaiheisen PWM-verkkosuuntaajan periaatteellinen kytkentä. [24]

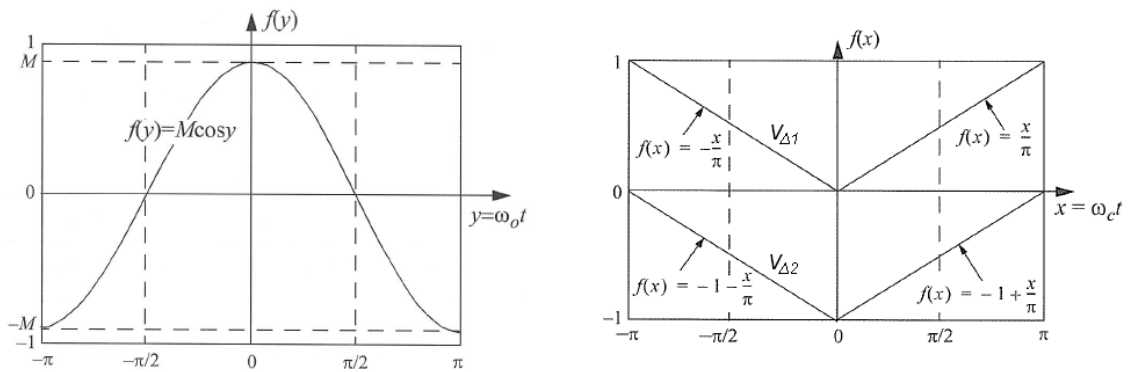


Kuva 47. Kolmitasoisen kolmivaiheisen PWM-verkkosuuntaajan käytännön kytkentä. [24]

Kolmitasoisissa laitteissa tulee hallita välipiirin välipisteen M potentiaalia. Tuo potentiaali saattaa lähteä ajautumaan sivuun oikeasta arvostaan esimerkiksi äkillisten kuormitusmuutosten tai kondensaattoreiden epätasaisen kuormituksen vuoksi. Jos pisteen M potentiaali muuttuu, välipiirin jännite on epäsymmetrinen, jolloin myös vaihei-

den jännitteet ja virrat saattavat olla epäsymmetriset. Tämä aiheuttaa myös matalataajuisia yliaaltoja laitteen jännitteisiin ja virtoihin. Välipiirin kondensaattoreiden jännitteitä tulee siis hallita aktiivisesti ohjauksella. [24]

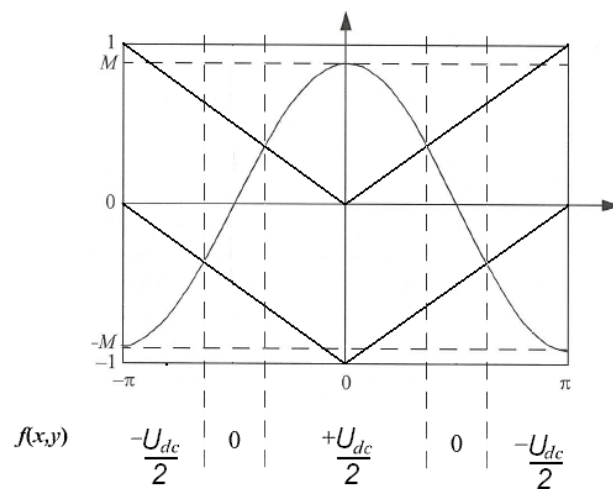
Kolmitasoiseen pulssinleveysmodulointiin voidaan käyttää sini-kolmiovertailua. Eräs tapa sisältää kaksi kolmioaalloa joista kolmioaallon $v_{\Delta 1}$ arvo vaihtelee välillä $0 \dots +A$, ja kolmioaallon $v_{\Delta 2}$ arvo vaihtelee välillä $-A \dots 0$, joissa A tarkoittaa sinimuotoisen modulointiaallon maksimiampplitudia, jolloin modulointi-indeksi M saa arvon 1. Kun sinimuotoisen modulointiaallon arvo on suurempi kuin kolmioaallon $v_{\Delta 1}$ arvo, vaihtokytkin on yläasennossaan ja vaiheeseen kytketään potentiaali DC+. Kun modulointiaallon arvo on pienempi kuin kolmioaallon $v_{\Delta 1}$ arvo, mutta suurempi kuin kolmioaallon $v_{\Delta 2}$ arvo, vaihtokytkin on väliasennossaan ja vaihe kytketään välipiirin nollapotentiaaliin. Modulointiaallon arvon ollessa pienempi kuin kolmioaallon $v_{\Delta 2}$ arvo, vaihtokytkin on ala-asennossaan ja vaiheeseen kytketään potentiaali DC-. Kuvissa 48 ja 49 sekä taulukossa 14 on esitetty modulointilogiikkaa, kun kolmioaallon taajuus on sama kuin modulointiaallon taajuus.



Kuva 48. Sinimuotoinen modulointiaalto sekä kolmioaallot $v_{\Delta 1}$ ja $v_{\Delta 2}$. [25]

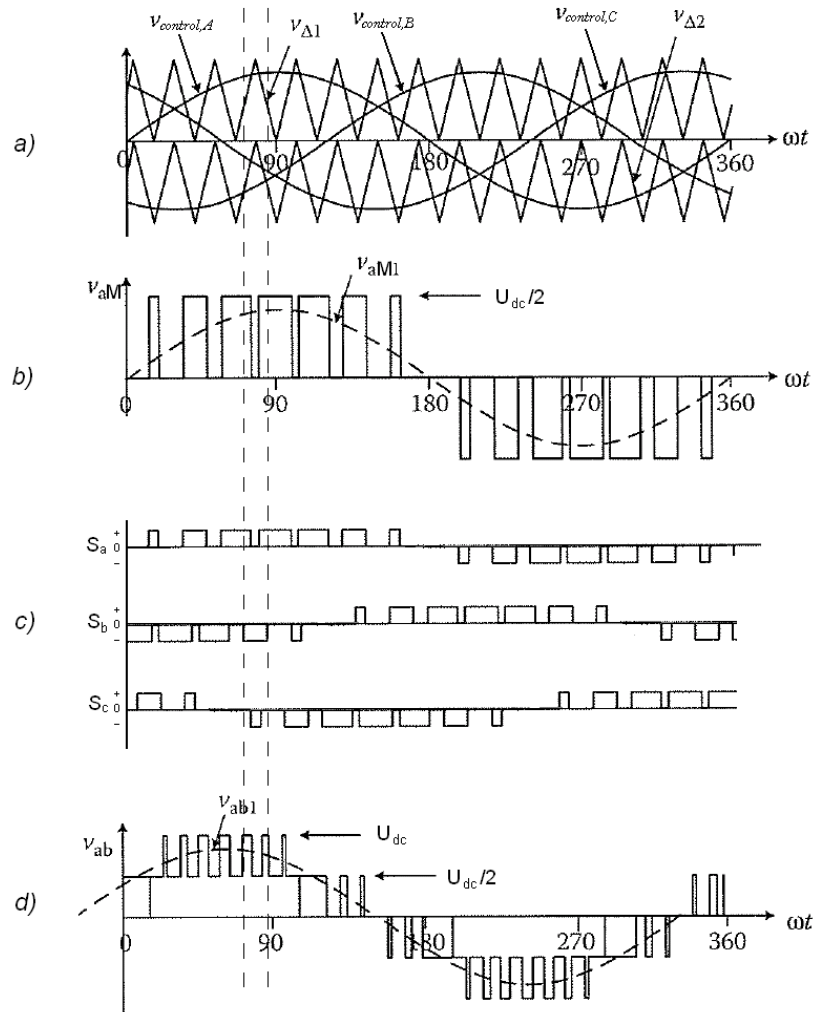
Taulukko 14. Jännitteen valinta kolmitasoisessa sini-kolmiovertailussa matemaattisesti ilmaistuna. [25]

$f(x,y)$	When $-\pi \leq x \leq 0$	When $0 < x \leq \pi$
$+U_{dc}/2$	$M \cos y > -\frac{x}{\pi}$	$M \cos y > \frac{x}{\pi}$
0	$-1 - \frac{x}{\pi} < M \cos y < -\frac{x}{\pi}$	$-1 + \frac{x}{\pi} < M \cos y < \frac{x}{\pi}$
$-U_{dc}/2$	$M \cos y < -1 - \frac{x}{\pi}$	$M \cos y < -1 + \frac{x}{\pi}$



Kuva 49. Jännitteen valinta-alueet kolmitasoisessa sini-kolmiovertailussa.

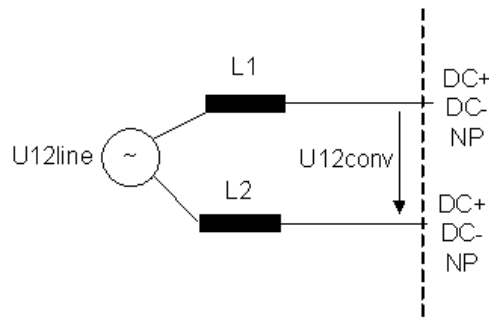
Todellisissa laitteissa kolmioaaltojen taajuus on suurempi kuin modulointiaallon taajuus sekä käytössä on kolme vaihetta. Kuvassa 50 on esitetty kolmitasoisien kolmi-vaiheisen PWM-suuntaajan modulointia, vaihtokytkimien ohjauslogiikkaa sekä jännit-teiden muotoja. Kuten edelläkin, puolijohdekytkimillä toteutetun todellisten laitteiden ohjaus tulee sovittaa vastaamaan periaatteellisten vaihtokytkimien toimintaa.



Kuva 50. Kolmitasosen kolmivaiheisen PWM-suuntaajan sini-kolmiovertailua. a) Sinimuotoiset modulointiaallot $v_{control,A}$, $v_{control,B}$, $v_{control,C}$ ja kolmioaallot $v_{\Delta 1}$ sekä $v_{\Delta 2}$, b) suuntaajan tulon vaiheen a jännite, c) periaatekytkennän vaihtokytkinten S_a , S_b ja S_c asennot ja d) vaiheiden a ja b välinen pääjännite. Muokattu lähteestä [20]

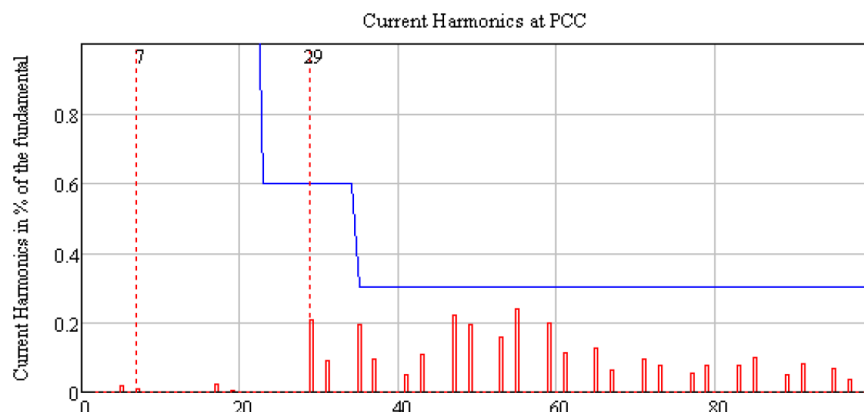
Kuvan 50 pääjännitteen v_{ab} käyrämuodosta huomataan, että kolmitasoisessa laitteessa pääjännitteellä on viisi jännitetasoa, toisin kuin kaksitasoisten laitteiden pääjännitteillä, joilla on kolme jännitetasoa. Kun kaksi- ja kolmitasoisilla laitteilla käytetään samaa kytkentätaajuutta, kolmitasoisilla laitteilla ilmenee vähemmän yliaaltoja jännitteissä ja virroissa tästä syystä. Kuvassa 51 on selventävä kuva kolmitasosen suuntaajan viisitasoisen pääjännitteen muodostumisesta. Kuvassa on esitetty verkon pääjännite U_{12line} sekä suuntaajan pääjännite U_{12conv} . Katkoviivan oikealla puolella on potentiaalit, joita kumpaakin vaiheeseen voidaan kytkeä, eli DC+, NP ja DC-. Eri kytkentävaihtoehtoja on yhdeksän, joista saadaan eroteltua suuntaajan pääjännitteelle viisi eri jännitetasoa: U_{DC} , $\frac{U_{DC}}{2}$, 0 , $-\frac{U_{DC}}{2}$ ja $-U_{DC}$.

Kaksitasoisella laitteella valittavat potentiaalit ovat DC+ ja DC-, joista saadaan suuntaajan pääjännitteelle kolme eri jännitetasoa: U_{DC} , 0 ja $-U_{DC}$.



Kuva 51. Kolmitasaisen verkkosuuntaajan pääjännitteen muodostuminen tasajännitepiirin eri potentiaaleista. [26]

Koska kolmitasoisissa laitteissa on tämä lisäkytkentämahdollisuus, saadaan verkon induktanssin yli vaikuttamaan verkkojännitteen ja koko tasajännitepiirin välinen jännite sekä lisäksi verkkojännitteen ja tasajännitepiirin jännitteen puolikkaan välinen jännite ja virta voidaan kytkeä kulkemaan useampia eri reittejä pitkin kuin kaksitasoisessa. Kun induktanssin yli saadaan hallitusti vaikuttamaan useampia jännite-eroja, saadaan verkkovirran yliaaltojen amplitudia pienennettyä, koska esimerkiksi verkkovirran positiivisen jakson aikana ei tarvitse kytkeä virtaa kulkemaan negatiiviseen tasajännitekiskoon, kuten kaksitasoisella laitteella, vaan kytketään virta kulkemaan tasajännitepiiriin nollajännitteeseen. Tällöin virran sahalaitaisen särön nousevien ja laskevien reunojen kulmakertoimet saadaan sovitettua tilanteeseen paremmin kuin kaksitasoisella laitteella joten virran aaltoisuuden amplitudi pienenee ja yliaallot vähenevät verrattuna kaksitasoisiin laitteisiin. Myös puolijohteiden jänniterasitukset ovat pienempiä kolmitasotekniikkaa käyttävissä laitteissa verrattuna kaksitasoisiin laitteisiin. Kuvassa 52 on esitetty erään kolmitasoisista pulssinleveysmodulaatiota käyttävän 9 MVA tehoisen taajuusmuuttajan suodatettu yliaaltosisältö generaattorimoodissa. Suodattimen koko voi olla pieni, sillä pulssikuviota muokkaamalla pystytään kumoamaan harmonisia yliaaltoja [27]. Kuvassa esitetyssä yliaaltosisällössä on enintään 0,25 % yliaaltokomponentteja ja 100 ensimmäisestä yliaallosta laskettu THD-arvo jää alle yhden prosentin.



Kuva 52. Punaisilla palkeilla erään kolmitasaisen pulssinleveysmoduloidun taajuusmuuttajan yliaaltosisältö generaattorimoodissa. [27]

Tässä osiossa esiteltiin yleistä taajuusmuuttajatekniikkaa, jota käytetään sekä pienettä keskijännitelaitteissa. Lopuksi esiteltiin pulssinleveysmodulointia kolmitasotekniikkaa, jota käytetään nykyisissä suuritehoisissa taajuusmuuttajissa aina kymmenien megawattien teholuokkaan saakka. Tämän osion tarkoituksena oli myös antaa lukijalle kuva, mitä etuja pulssinleveysmoduloidusta kolmitasotekniikasta on suuritehoiselle taa-

juusmuuttajalle verraten pienempitehoisissa taajuusmuuttajissa käytettävään tekniikkaan, etenkin verkkokommutoiviin siltoihin verrattuna.

4 Monipulssimenetelmät

Tekniikan kehittyessä taajuusmuuttajia pystytään käyttämään yhä suuremmissa teholuokissa. Toisaalta tehon kasvaessa tehoelektroniikkalaitteille ominaiset virran yliaallot lisääntyvät ja niiden suodattaminen vaikeutuu. Tähän ongelmaan yksi ratkaisu on pulssiluvun nosto.

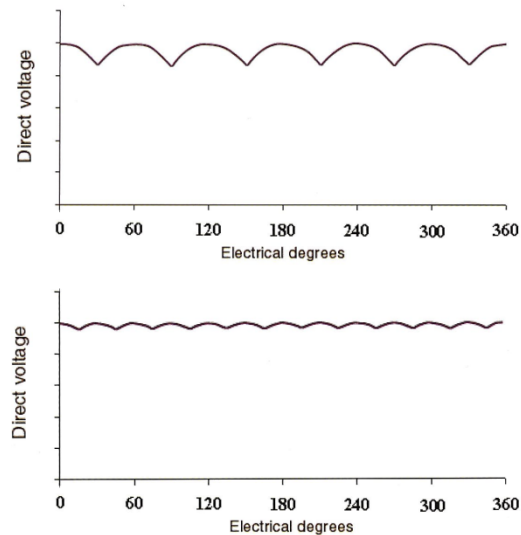
Nimitystä monipulssimenetelmä käytetään taajuusmuuttajien yhteydessä silloin, kun verkkokommutoivalla sillalla tasasuunnatussa verkkojännitteessä esiintyy enemmän kuin kuusi pulssia verkkojakson aikana. Monipulssiset järjestelmät koostuvat useammasta kuusipulssisesta järjestelmästä kytkettyinä rinnan tai sarjaan siten, että järjestelmien välillä on sopivan suuruinen vaihesiirto. Sarjaan kytketyt järjestelmät sietävät paremmin verkossa esiintyviä yliaaltoja, mutta vaativat suuremman virtakestoisuuden puolijohteilta verrattuna rinnankytkentään. Tämän diplomityön aihepiiriin liittyy suuret virrat, joten työssä tarkastellaan rinnankytkettyjä järjestelmiä.

Pulssiluvun nostaminen toteutetaan kytkemällä useampi verkkosilta siten, että osa harmonisista yliaalloista joita silta generoi, kumoutuvat toisen sillan generoimilla yliaalloilla. Kumoutuvien harmonisten yliaaltojen järjestysluvut riippuvat käytettävästä kytkennästä. Monipulssimenetelmät ovat tehokkaampia keinoja yliaaltojen vähentämiseen, kuin kuusipulssisen järjestelmän verkkovirran suodattaminen. Myös tasajännitteen särö vähenee tehokkaasti monipulssimenetelmillä. [28]

Verkkosillat kytketään rinnakkain muuntajalla, jonka kytkennällä saadaan aikaan siltojen välinen vaihesiirto ja joidenkin harmonisten yliaaltojen kumoutuminen. Eri kytkentöjä käyttämällä voidaan toteuttaa periaatteessa 12-, 18-, 24-, 36- tai jopa 48-pulssisia laitteita. Laitteistojen sähkön laatu paranee pulssiluvun kasvaessa, mutta laitteen hinta kasvaa vastaavasti osien määrän kasvaessa. Käytännön sovelluksia silmällä pitäen tässä työssä käsitellään ainoastaan 12- ja 18-pulssisia laitteistoja. Pulssiluvun nostaminen ei poista käytön verkkoon jarruttamisen mahdollisuutta, mutta selvyuden vuoksi käytetään laitteistojen teoriatarkastelussa ja vertailussa 1Q-käyttöä eli diodisiltaa.

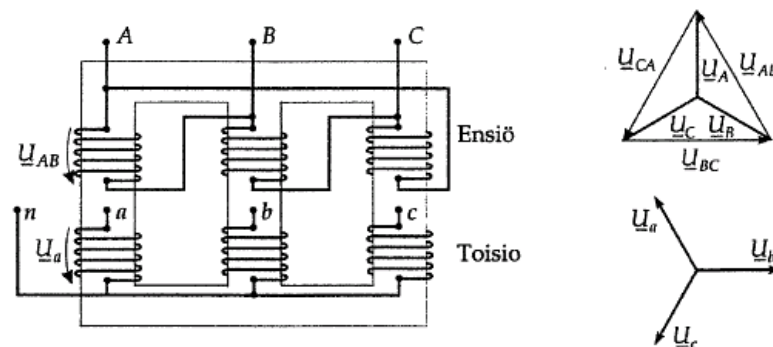
4.1 12-pulssinen laitteisto

12-pulssinen taajuusmuuttajalaitteisto koostuu kahdesta kuusipulssisesta verkkosillasta ja kahdesta muuntajasta tai kahdesta kuusipulssisesta verkkosillasta ja yhdestä kolmikäämimuuntajasta. Muuntajien diodisiltojen puoleisten käämien välillä tulee olla 30° vaihesiirto. Tällöin tasajännitteen pulssisuus on tasainen (kuva 53) [29]. Vaihesiirto saadaan aikaan muuntajien kytkennällä, joita on useita mahdollisia. Seuraavaksi esitellään periaate eri muuntajakytkentöjen muodostamiselle.



Kuva 53. Ylempänä kuusipulssinen tasajännite ja alempana 12-pulssinen tasajännite. [29]

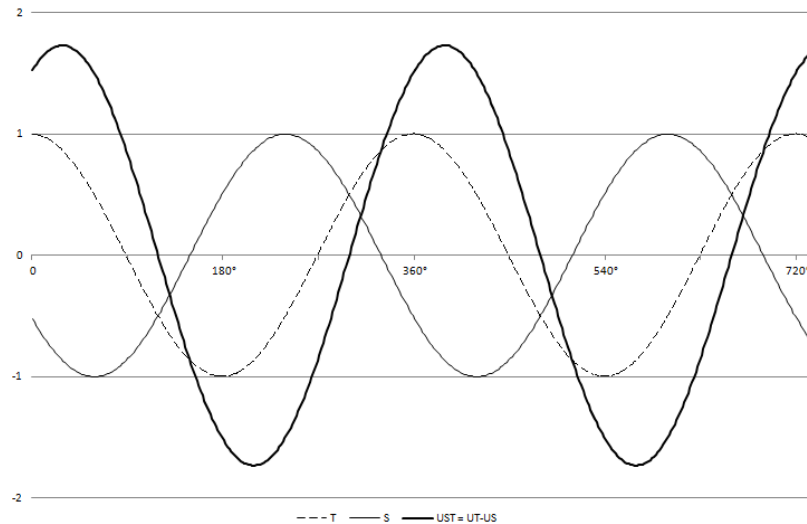
Suomessa käytettyjen jakelumuuntajien yläjännite on yleensä 20 kV ja käämi on normaalisti kolmiokytkentäinen eli D. Vastaavasti alajännite on 400 V ja käämi on tähtikytkentäinen eli Y. Tällaisen muuntajan muuntosuhde, eli ensiökäämin jännitteen suhde toisiokäämin jännitteeseen, on $\frac{20000 \text{ V}}{400 \text{ V}} = 50$. Kytkentäryhmä voi olla esimerkiksi Dyn11. Numero kytkentäryhmän lopussa tarkoittaa kellotaulun numeroa 11, joka on 30° numerosta 12 vastapäivään, eli kytkentäryhmän vaihesiirto on 30° siten, että toisiojännite on ensiöjännitettä edellä (kuva 54). Tätä vaihesiirtoa pystytään muuttamaan muuntajan käämien kytkentää muuttamalla esimerkiksi siten, että toisiojännite on ensiöjännitettä 30° jäljessä, jolloin kytkentäryhmä on Dyn1. Kolmio-tähti-kytkentä on yleinen suuritehoisissa jakelumuuntajissa. [30]



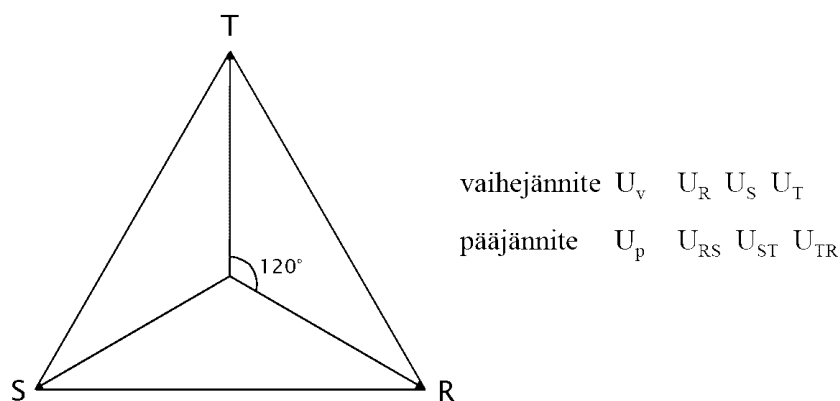
Kuva 54. Kytkentä Dyn11 ja sen jännitteet [30]

Muuntajaan syntyy vaihesiirtoa kolmio- ja tähtikytkennän suhteen vuoksi. Saman vaiheen ylä- ja alajännitekäämi on käämitty samalle muuntajasydämen pylväälle joten näiden käämien jännitteiden välinen vaihesiirto on 0. Kolmiokytkentäinen yläjännitekäämi on pääjännitteinen ja tähtikytkentäinen alajännitekäämi on vaihejännitteinen, ja vaihejännitteistä muodostuu pääjännite vähentämällä yhden vaiheen jännitteen hetkellisarvo toisesta. Kuvassa 55 on esitetty vaiheiden U_S ja U_T vaihejännitteet ja näiden vaiheiden välinen pääjännite U_{ST} joka on saatu vähentämällä vaiheen S jännitteen hetkellisarvo vaiheen T jännitteen hetkellisarvosta. Kuten tästä kuvasta voidaan nähdä, pää-

jännite on hieman vaiheen T jännitettä jäljessä. Pää- ja vaihejännitteen suhde voidaan esittää myös vektorimuodossa (kuva 56). Vektorimuotoisesta esityksestä nähdään suoraan vaihe- ja pääjännitteiden välinen kulmaero, joka on tässä tapauksessa 30° . Vektorimuotoista esitystä ja aikaesitystä jännitteistä voidaan verrata. Kuvissa 55 ja 56 vaihejännitteiden ja pääjännitteiden tunnuksat vastaavat toisiaan. Pääjännite U_{ST} on 30° vaihejännitettä U_T jäljessä ja tämä on nähtävissä kummastakin kuvasta.



Kuva 55. Kaksi vaihejännitettä ja niiden välinen pääjännite ajan funktiona

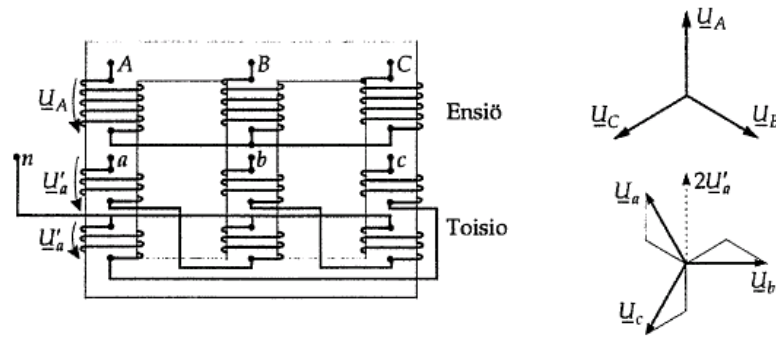


Kuva 56. Pää- ja vaihejännitteet vektorimuodossa [31]

Muiden vaihetta siirtävien muuntajien rakenne perustuu samanlaiseen vaihesiirtoon ylä- ja alajännitekäämien välillä. Alajännitekäämi voidaan pilkkoa osiin ja asettaa saman vaiheen käämin osat eri pylväille kuten hakatähtikytkeissä muuntajassa. Tällaista muuntajatyyppeä käytetään yleensä pienitehoisissa jakelumuuntajissa kytkentäryhmällä Yzn11 (Kuva 57). [30] Kytkentäryhmällä Yzn11 on sama vaihesiirto kuin kytkentäryhmällä Dyn11 eli toisiojännite on 30° ensiojännitettä edellä. Hakatähtikytkenessä Yzn11 toisiojännite yhden vaiheen jännite muodostuu kahdessa käämissä, joilla on sama käämijännite ja jotka sijaitsevat eri pylväillä eli ensiön eri vaiheiden vaikutuspiirissä. Esimerkiksi kuvan 57 toisiojännite A jännite muodostuu pylvään B vastasuuntaan kytketystä käämistä ja pylvään A myötäsuuntaan kytketystä käämistä. Toisiojännite a koostuu siis puoliksi ensiojännitteestä B vaihesiirrettynä 180° ja puoliksi ensiojännitteestä A ilman vaihesiirtoa. Kun valitaan kulmareferenssiksi vaiheen A ensiojännite, toisiojännite a voidaan esittää vektorimuodossa

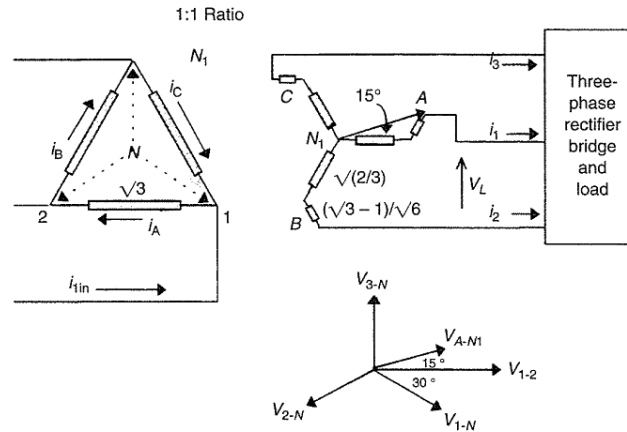
$$\bar{U}_a = \frac{N}{\sqrt{3}} * (-\bar{U}_B) + \frac{N}{\sqrt{3}} \bar{U}_A = \frac{N}{\sqrt{3}} U_B \angle 60^\circ + \frac{N}{\sqrt{3}} U_A \angle 0^\circ = N U_a \angle 30^\circ, \quad (14)$$

missä U_a on A-vaiheen toisiojännite, U_A on A-vaiheen ensiöjännite, U_B on B-vaiheen ensiöjännite ja N on ensiön käämin kierroslukumäärä. Toision käämin osien kierroslukumäärät ovat keskenään yhtä suuret ja $\frac{1}{\sqrt{3}}$ -kertaiset ensiön käämin kierroslukumäärään verrattuna. Tällöin muuntosuhde on 1.



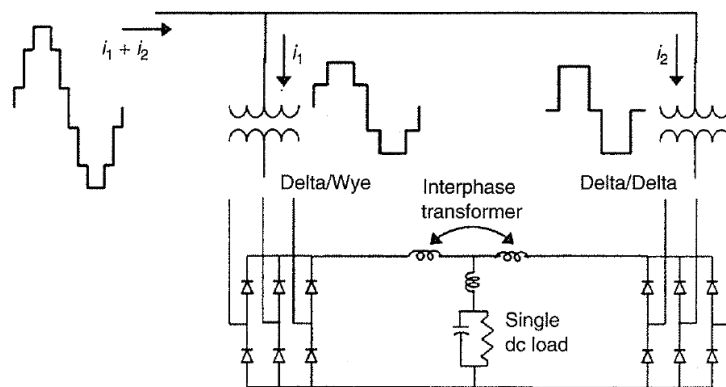
Kuva 57. Hakatahtikytkentä Yzn11 ja sen jännitteet [30]

Erisuuruisia vaihesiirtoja voidaan saada aikaan toision käämin osien kierroslukuja muuttamalla. Kuvassa 58 esitetyssä kytkennässä muuntosuhde on 1 ja toision käämin osien jännitteiden suhde on $\frac{\sqrt{2/3}}{(\sqrt{3}-1)/\sqrt{6}} \approx 2,732$. Tällä kytkennällä saadaan aikaan 15° vaihesiirto. Tällöin toisiokäämin osa, jossa on suurempi kierrosluku, sijaitsee samalla pylväällä kuin saman vaiheen ensiökäämi. Vaihesiirron suunnan voi valita toisiokäämin kytkennällä joten 12-pulssisen järjestelmän vaatima 30° vaihesiirto saadaan aikaan kahdella tällaisella hakatahteen kytketyllä muuntajalla, joiden vaihesiirrot ovat -15° ja 15° . Tällöin muuntajat toteututettaisiin kuvan 58 merkinnöin siten, että toision vaiheen A käämin pidempi osa sijaitsee samalla pylväällä, kuin ensiön vaiheen A käämi, mutta lyhempi osa eri pylväällä. Tässä tapauksessa 15° vaihesiirretyn muuntajan toisiovaiheen A käämin lyhempi osa sijaitsee vastasuuntaan kytkettynä pylväällä B. -15° vaihesiirretyn muuntajan toisiokäämin A lyhempi osa taas sijaitsee vastasuuntaan kytkettynä pylväällä C. Muut vaiheet rakentuvat samalla tavalla. Ensiökäämin kytkeminen kolmioon tai tähteen ei rajoita eri vaihesiirtojen toteuttamista muuntajassa. Vaihesiirron mahdollistavia muuntajakytkentöjä on useita muitakin, esimerkiksi polygonimuuntaja ja lukuisia eri säästömuuntajakytkentöjä, mutta ne jätetään käsittelemättä tässä työssä selvyyden vuoksi.



Kuva 58. Dz-kytkentä, jolla on 15° vaihesiirtoa [28]

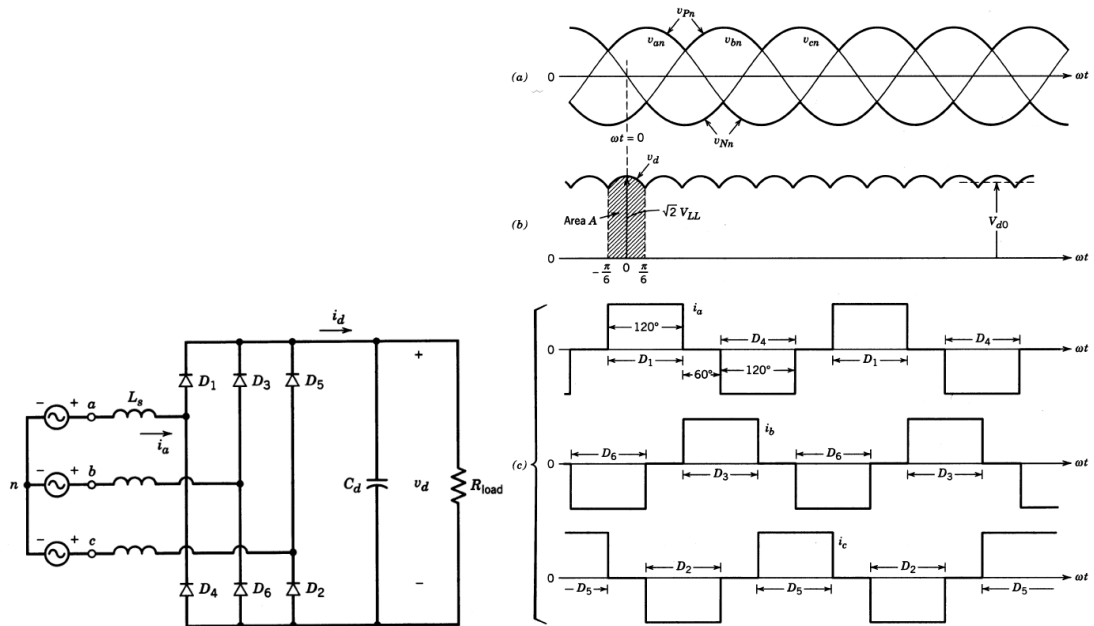
12-pulssinen järjestelmä voidaan toteuttaa esimerkiksi kytkemällä Dy11- ja Dd0-kytketyt muuntajat rinnan ensiöpuolelta. Kuormien tulee olla identtiset ja muuntajien muuntosuhteet täytyy olla sellaiset, että kummankin muuntajan toisiopuolella on sama jännite jotta kuorma jakautuu tasaisesti muuntajien välille. Dy-kytketyn muuntajan muuntosuhde tulee siis olla $\sqrt{3} : 1$ suhteessa Dd-kytkettyyn muuntajaan Dy-muuntajan vaihe-pääjännite -suhteen vuoksi. [28] Merkintä $\sqrt{3} : 1$ tarkoittaa muuntajan ensiö- ja toisiopuolten kierroslukujen suhdetta siten, että kaksoispisteen vasemmalla puolella on ensiöpuolen kierrosluku ja oikealla puolella on toisiopuolen kierrosluku. Käytetään tästä eteen päin jokaisen Dd- tai Yy-muuntajan muuntosuhteena arvoa 1:1. Näin muita muuntajia on helpompi verrata edellä mainittuihin tyyppeihin. Edellä kuvatun 12-pulssisen järjestelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 59. Seuraavaksi tarkastellaan tarkemmin kummallakin eri muuntajakytkennällä toteutettuja kuusipulssikytkentöjä ja niiden yhdistämistä.



Kuva 59. 12-pulssisen järjestelmän toteutus Dy(Delta/Wye)- ja Dd(Delta/Delta)- kytkettyjen muuntajien avulla. [28]

4.1.1 Dd- ja Yy-kytkettyjen muuntajahaarojen virtojen fourier-sarja

Kuusipulssisen diodisillan kytkentä sekä saman piirin jännitteen ja virran käyrämuodot on esitetty kuvassa 60. Jännitteen ja virran käyrämuodot ovat kuvassa esitetyn mukaiset, kun kommutointia ja syöttöverkon induktanssia ei oteta huomioon, sekä oletetaan tasavirran olevan täysin tasoittunutta.



Kuva 60. Kuusipulssisen diodisillan kytkentä sekä ideaaliset käyrämuodot. a) vaihejännitteet, b) tasajännite, c) vaihevirrat. [14]

Kuusipulssisen diodisillan aiheuttama verkkovirran yliaaltosisältö saadaan laskettua fourier-sarjan avulla.

Funktion $f(t)$ Fourier-sarja on muotoa

$$f(t) = F_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)\}$$

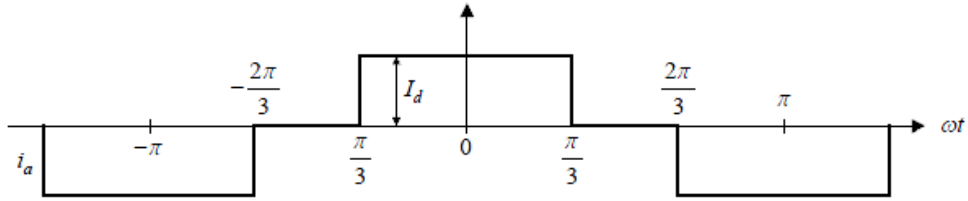
missä F_0 on funktion $f(t)$ keskiarvo. Fourier-sarjan kertoimet saadaan laskettua seuraavista kaavoista:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(\omega t) \quad (15)$$

$$a_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(h\omega t) d(\omega t) \quad (16)$$

$$b_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(h\omega t) d(\omega t) \quad (17)$$

Vaihevirta i_a on esitetty alla olevassa kuvassa 61. Kuvasta nähdään, että vaihevirran keskiarvo on nolla eli $F_0 = 0$. Origo on asetettu virtapulssin keskelle, minkä vuoksi Fourier-sarja sisältää vain kosinitermejä.



Kuva 61. Vaihevirta i_a ja integrointirajat. [32]

Symmetrian vuoksi integrointi puolen jakson yli riittää

$$\begin{aligned}
 a_h &= \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\frac{\pi}{3}} I_d \cos(h\omega t) d(\omega t) - \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} I_d \cos(h\omega t) d(\omega t) \right] \\
 &= \frac{2I_d}{h\pi} \left[\left. \sin(h\omega t) \right|_0^{\frac{\pi}{3}} - \left. \sin(h\omega t) \right|_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \right] = \frac{2I_d}{h\pi} \left[\sin\left(h\frac{\pi}{3}\right) + \sin\left(h\frac{2\pi}{3}\right) \right] \\
 &= \frac{2I_d}{h\pi} \left[\sin\left(h\frac{\pi}{3}\right) + 2\sin\left(h\frac{\pi}{3}\right) \sin\left(h\frac{\pi}{3}\right) \right] = \frac{2I_d}{h\pi} \sin\left(h\frac{\pi}{3}\right) \left[1 + 2\cos\left(h\frac{\pi}{3}\right) \right] \quad (18)
 \end{aligned}$$

Edellisestä kaavasta nähdään, että

$ah = 0$, kun $h = 0, \pm 3, \pm 6, \dots$ ja kun $h = 2, 4, 6, \dots$

$ah \neq 0$, kun $h = k6 \pm 1, k = 0, 1, 2, \dots$

Lasketaan muutaman ensimmäisen kosinitermien lukuarvo:

$$a_1 = \frac{2I_d}{\pi} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \quad (19)$$

$$a_5 = \frac{2I_d}{5\pi} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -\frac{2\sqrt{3}}{5\pi} I_d = -\frac{1}{5} a_1 \quad (20)$$

$$a_7 = \frac{2I_d}{7\pi} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{2\sqrt{3}}{7\pi} I_d = \frac{1}{7} a_1 \quad (21)$$

Fourier-sarjaksi saadaan

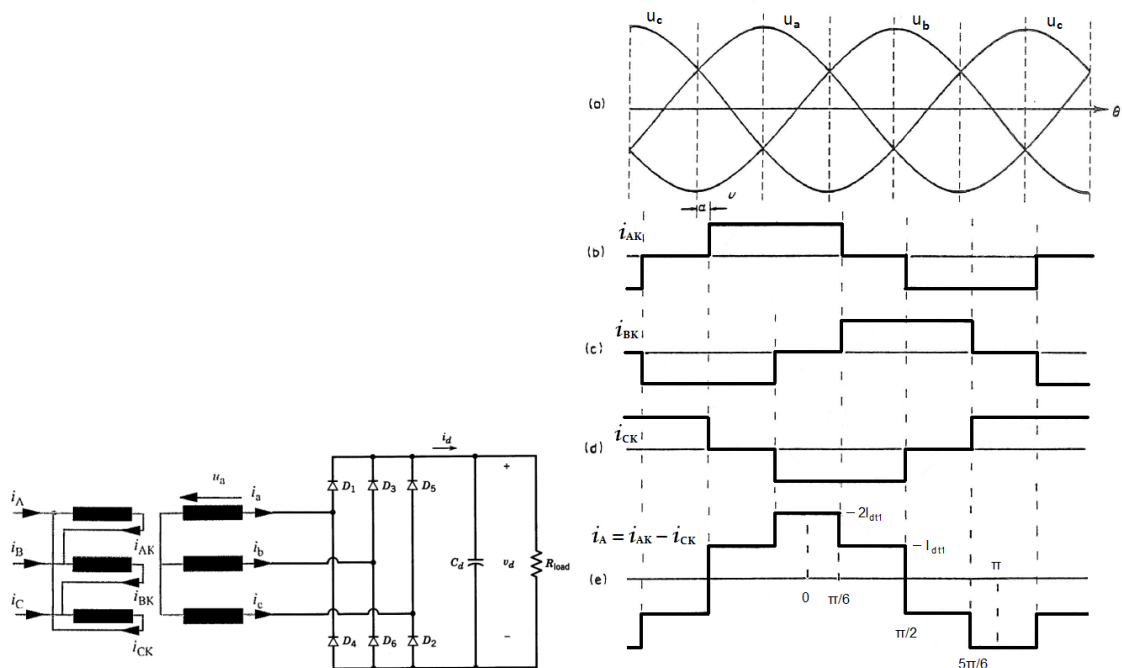
$$[31] i_{Da}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \dots \right]. \quad (22)$$

Tuloksesta 22 nähdään, että kuusipulssisen diodisillan verkkovirta sisältää perusaallon lisäksi viidettä yliaaltoa 180° siirtyneenä, seitsemättä yliaaltoa 0° siirtyneenä, 11. yliaaltoa 180° siirtyneenä ja niin edelleen. Tämän tuloksen antama virran käyrämuoto

vastaa myös ideaalitalanteessa Yy- ja Dd- kytketyllä muuntajalla verkkoon liitetyn kuusipulssidiodisillan verkkovirran käyrämuotoa, sillä näissä muuntajakytkennoissä ei ole vaihesiirtoa. Tulosta 22 käytetään siis 12-pulssisen järjestelmän tarkastelussa Dd-kytketyllä muuntajalla verkkoon liitetyn diodisillan käyrämuotona.

4.1.2 Dy-kytketyn muuntajahaaran virran fourier-sarja

Dy-kytketyllä muuntajalla verkkoon kytketyn järjestelmän diodisilta on samanlainen kuin Dd-kytketyllä muuntajalla verkkoon kytketty silta. Muuntajan toisio on kytkettynä tähteen ja muuntajan muuntosuhde on $\sqrt{3} : 1$ suhteessa Dd-kytkettyyn muuntajaan.[28] Kuvassa 62 on esitetty edellä kuvattu järjestelmä. Järjestelmän verkkovirta on erilainen kuin Dd-kytkentää käyttävän järjestelmän ja juuri tämän takia näillä kahdella muuntajakytkennoillä voidaan toteuttaa 12-pulssinen järjestelmä. Dy-kytkennän verkkovirta koostuu kuvassa 62 esitetyllä tavalla muuntajapylväiden käämivirroista siten, että pylvään käämivirran hetkellisarvosta vähennetään toisen pylvään käämivirran hetkellisarvo. Esimerkiksi kuvassa 62 esitetty virta i_A saadaan vähentämällä käämivirta i_{CK} käämivirrasta i_{AK} Kirchhoffin virtalain mukaisesti. Nämä pylväiden käämivirrat i_{AK} , i_{BK} ja i_{CK} ovat samassa vaiheessa ja saman muotoisia kuin sillan vaihevirrat i_a , i_b ja i_c . Kuvaa tutkimalla voi huomata, että verkkovirran perusaalto on juuri 30° pylväiden käämivirtoja, ja täten muuntajan toisiovirtoja ja sillan vaihevirtoja, jäljessä. Seuraavaksi lasketaan Dy-muuntajaa käyttävän kuusipulssisillan verkkovirran yliaaltosisältö fourier-sarjan avulla.



Kuva 62. kuusipulssidiodisillan ja Dy-kytketyn muuntajan käyrämuotoja. a) Muuntajan toisioin jännitteet, b) Muuntajan ensiön a-pylvään käämivirta, c) Muuntajan ensiön b-pylvään käämivirta, d) Muuntajan ensiön c-pylvään käämivirta, e) Kytken A-vaiheen verkkovirta. Muokattu lähteistä [15] [33]

Fourier-sarja kannattaa muodostaa samalla tavalla kuin edellisessäkin tapauksessa sijoittamalla nollakohta pulssin huipun keskelle (kuva 62). Näin sarjassa ei ole lainkaan sinitermejä ja laskenta helpottuu. Aaltomuodon keskiarvo on nolla, joten fourier-termi F_0 voidaan jättää pois. Symmetrisyyden vuoksi tarvitsee integroida vain puoli aaltoa. Kuvassa 62 virtataso I_{dt1} tarkoittaa muuntajan ensiön käämivirran (i_{AK} , i_{BK} , i_{CK}) amplitudia.

$$a_h = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi/6} 2I_{dt1} \cos(h\omega t) d(\omega t) + \int_{\pi/6}^{\pi/2} I_{dt1} \cos(h\omega t) d(\omega t) - \int_{\pi/2}^{5\pi/6} I_{dt1} \cos(h\omega t) d(\omega t) - \int_{5\pi/6}^{\pi} 2I_{dt1} \cos(h\omega t) d(\omega t) \right] \quad (23)$$

$$\begin{aligned} a_h &= \frac{2I_{dt1}}{h\pi} \left[\int_0^{\pi/6} 2\sin(h\omega t) + \int_{\pi/6}^{\pi/2} \sin(h\omega t) - \int_{\pi/2}^{5\pi/6} \sin(h\omega t) - \int_{5\pi/6}^{\pi} 2\sin(h\omega t) \right] \\ &= \frac{2I_{dt1}}{h\pi} \left[2\sin\left(h\frac{\pi}{6}\right) - 2\sin(h * 0) + \sin\left(h\frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(h\frac{\pi}{6}\right) - \left(\sin\left(h\frac{5\pi}{6}\right) - \sin\left(h\frac{\pi}{2}\right)\right) - \left(2\sin(h\pi) - 2\sin\left(h\frac{5\pi}{6}\right)\right) \right] \\ &= \frac{2I_{dt1}}{h\pi} \left[\sin\left(h\frac{\pi}{6}\right) + 2\sin\left(h\frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(h\frac{5\pi}{6}\right) \right] \quad (24) \end{aligned}$$

tulosta tutkimalla huomataan, että se on erisuuri kuin nolla, kun $h = \pm 5, \pm 7, \pm 11, \pm 13, \pm 17, \pm 19 \dots$ eli kun $h = k6 \pm 1$, jossa $k = 0, 1, 2, \dots$

$$a_1 = \frac{2I_{dt1}}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi}{6}\right) + 2\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(\frac{5\pi}{6}\right) \right] = \frac{2I_{dt1}}{\pi} * 3 = \frac{6I_{dt1}}{\pi} \quad (25)$$

$$a_5 = \frac{2I_{dt1}}{5\pi} \left[\sin\left(5\frac{\pi}{6}\right) + 2\sin\left(5\frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(5\frac{5\pi}{6}\right) \right] = \frac{2I_{dt1}}{5\pi} * 3 = \frac{1}{5}a_1 \quad (26)$$

$$a_7 = \frac{2I_{dt1}}{7\pi} \left[\sin\left(7\frac{\pi}{6}\right) + 2\sin\left(7\frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(7\frac{5\pi}{6}\right) \right] = -\frac{2I_{dt1}}{7\pi} * 3 = -\frac{1}{7}a_1 \quad (27)$$

fourier-sarja on muotoa

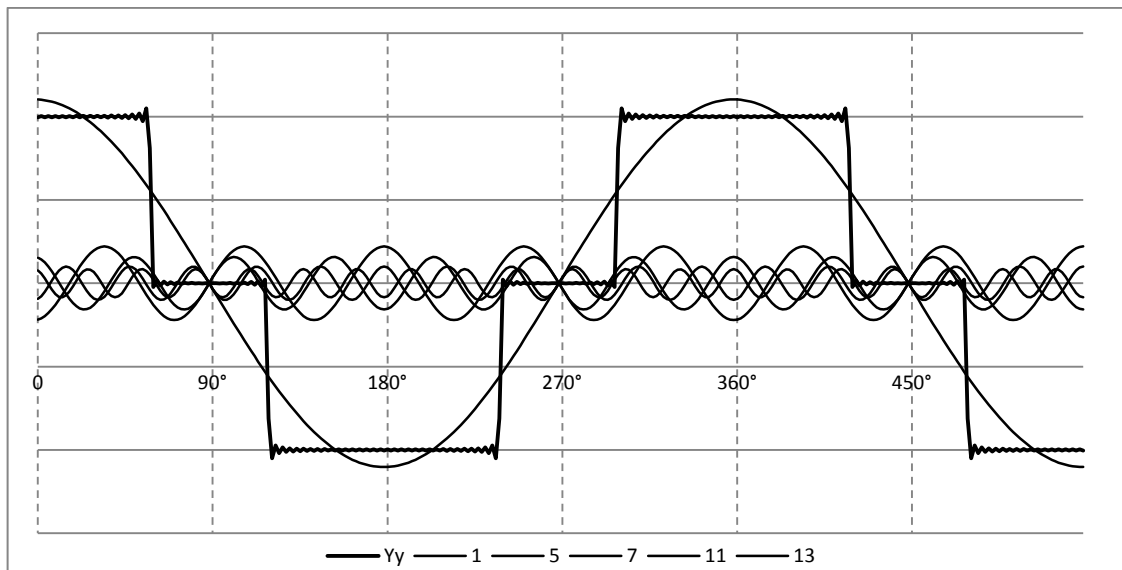
$$i_{Dy}(t) = \frac{6I_{dt1}}{\pi} \left[\cos(\omega t) + \frac{1}{5}\cos(5\omega t) - \frac{1}{7}\cos(7\omega t) - \frac{1}{11}\cos(11\omega t) + \dots \right] \quad (28)$$

Tuloksesta 28 nähdään, että verkkovirran perusaallon amplitudi on $\frac{6}{\pi}$ -kertainen muuntajan ensiön käämivirran suuruuteen verrattuna. Dd-kytketyssä järjestelmässä perusaallon amplitudi on $\frac{2\sqrt{3}}{\pi}$ -kertainen tasavirran suuruuteen verrattuna. Dy-kytketty järjestelmä tuottaa muuntosuhteella 1 : 1 siis $\frac{1}{\sqrt{3}}$ -kertaisen tasavirran samalla perusaallon amplitudilla verraten Dd-kytkettyyn järjestelmään ja kuten edellä mainittu, Dy-kytketyn muuntajan muuntosuhteen tulee olla $\sqrt{3} : 1$ suhteessa Dd-kytkettyyn muuntajaan jotta kummallakin kuusipulssisillalla on yhtä suuret kuormitukset. Näin saadaan $I_{dt1} = \frac{I_d}{\sqrt{3}}$ ja fourier-sarja saa muodon

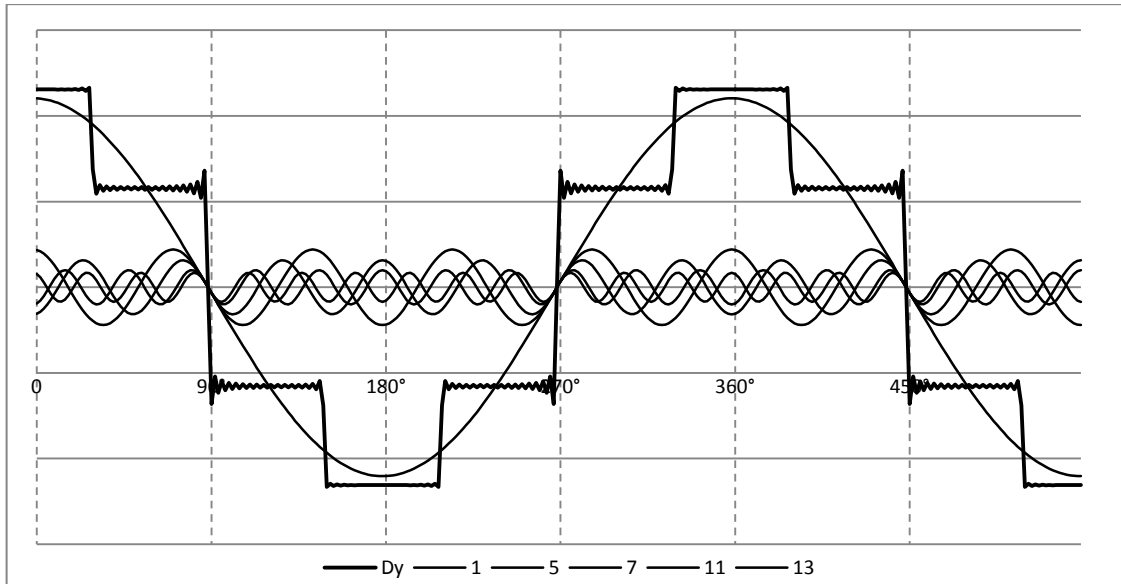
$$[15] i_{Dy}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\cos(\omega t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega t) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \dots \right] \quad (29)$$

4.1.3 12-pulssisen järjestelmän virran fourier-sarja

Ideaaltilanteessa verkko pitää 12-pulssisen järjestelmän perusaallot samassa vaiheessa ja siltojen välillä on täten 30° vaihesiirto. [28] Kuvat 63 ja 64 ovat piirretty kummankin järjestelmän fourier-sarjan perusteella ottamalla huomioon muuntajan muuntosuhteet ja niistä näkee hyvin järjestelmän toiminnan yliaaltojen kannalta.



Kuva 63. Dd-kytketyn järjestelmän verkkovirran perusaalto, esiintyvät yliaallot 17. yliaaltoon asti sekä esiintyvien yliaaltojen summa 100. yliaaltoon asti.



Kuva 64. Dy-kytetyin järjestelmän verkkovirran perusaalto, esiintyvät yliaallot 17. yliaaltoon asti sekä esiintyvien yliaaltojen summa 100. yliaaltoon asti.

Kuvia 63 ja 64 tutkimalla huomataan esimerkiksi 5., 7. ja 17. yliaallon olevan 180° vaihesiirrossa Dd- ja Dy-järjestelmien välillä. Tämä aiheuttaa ilmiön, jossa toisen järjestelmän yliaallot kumoavat toisensa, koska kun toinen järjestelmä haluaa ottaa verkosta tietyn virtapiikin, se saakin haluamansa virtapiikin toisesta sillasta ja kyseisiä virtapiikkejä ei esiinny verkkovirrassa. Esimerkiksi kuvassa 64 kohdassa 180° on viidennellä yliaallolla negatiivinen kupu. Kuvassa 63 on viidennellä yliaallolla samassa kohdassa saman muotoinen positiivinen kupu ja nämä kumoavat toisensa, kun järjestelmät kytetään rinnan. Summaamalla kummankin järjestelmän fourier-sarjat saadaan rinnankytketyn 12-pulssisen järjestelmän verkkovirran muoto laskettua. Otetaan tässä jo huomioon muuntajan muuntosuhteet eli perusaallot ovat yhtä suuret kummassakin järjestelmässä.

$$[15] i_{Dd}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \dots \right]$$

$$[15] i_{Dy}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\cos(\omega t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega t) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \dots \right]$$

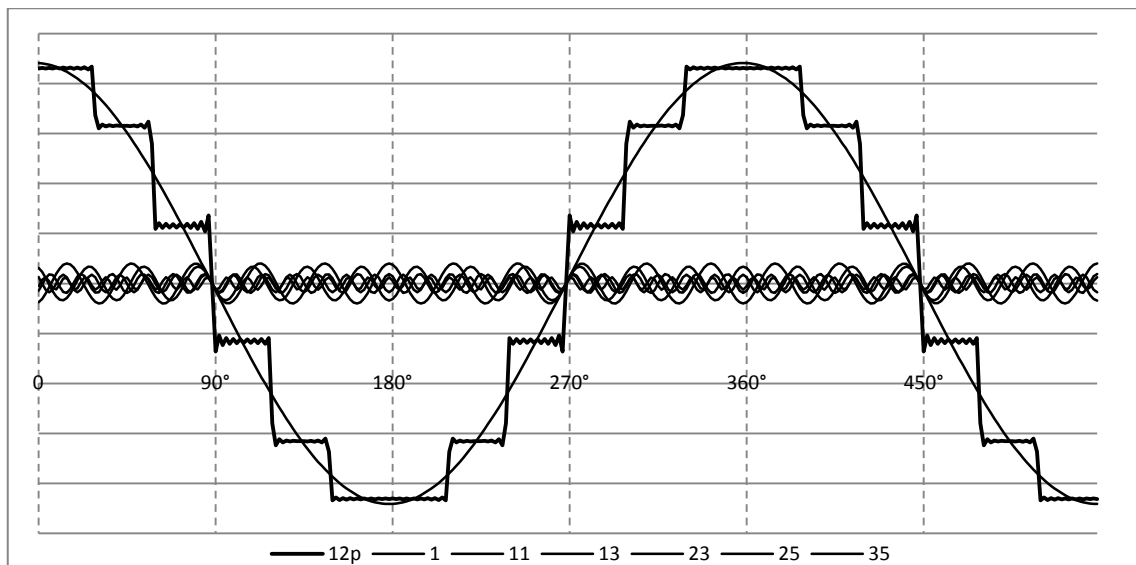
$$[15] i_{Dd}(t) + i_{Dy}(t) =$$

$$\frac{2(2\sqrt{3})}{\pi} I_d \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \frac{1}{23} \cos(23\omega t) + \frac{1}{25} \cos(25\omega t) - \dots \right] \quad (30)$$

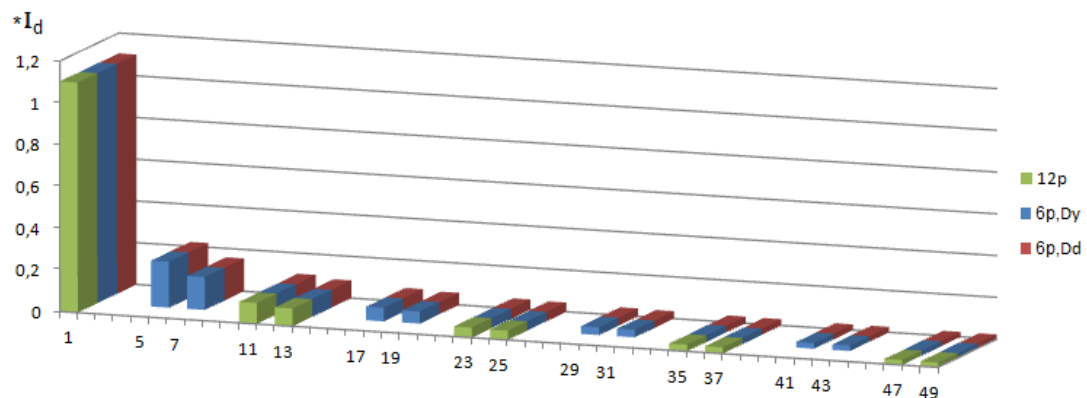
tulosta tutkimalla huomataan, että se on erisuuri kuin nolla, kun $h = \pm 11, \pm 13, \pm 23, \pm 25 \dots$ eli kun $h = k12 \pm 1$, jossa $k = 0, 1, 2, \dots$

Tuloksen 30 fourier-sarja kuvaa 12-pulssisen järjestelmän verkkovirran yliaaltosiältöä. Sarjan perusteella piirrettiin kuva 65. Tästä kuvasta näkee selvästi, että verkkovirran muoto on lähempänä siniaaltoa kuin kummallakaan edellä esitetyllä järjestelmällä. Kuvaa ja fourier-sarjoja vertaamalla huomataan, että jos kuorma on yhtä suuri kuusi-

pulssisella järjestelmällä kuin 12-pulssisella järjestelmällä, 12-pulssisella järjestelmällä esiintyvät samantaajuiset yliaaltojen amplitudit ovat yhtä suuret, kuin kuusipulssijärjestelmällä. Erona on se, että 12-pulssisessa järjestelmässä yliaaltoja ei esiinny niin monella harmonisella taajuudella kuin kuusipulssisessa järjestelmässä. 12-pulssisesta järjestelmästä puuttuvat kokonaan muiden muassa 5., 7., 17. ja 19. yliaallot. Etenkin matalilla taajuuksilla esiintyvät yliaallot vaikuttavat virran laatuun niiden suuremman amplitudin takia verrattuna suurempitaajuisiin yliaaltoihin. Kuvassa 66 on vertailtu kuusipulssisen ja 12-pulssisen järjestelmän yliaaltojen taajuuksia ja amplitudeja.



Kuva 65. 12-pulssisen järjestelmän perusaalto, esiintyvät yliaallot 35. yliaaltoon asti sekä esiintyvien yliaaltojen summa 100. yliaaltoon asti.



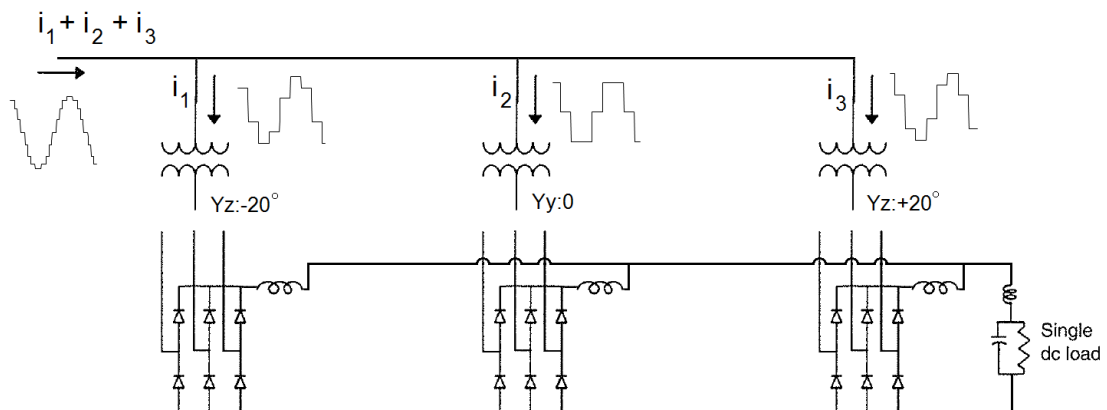
Kuva 66. Yliaaltojen taajuuksien ja amplitudien vertailua eri järjestelmien välillä. Taajuus ilmoitettu harmonisen yliaallon järjestysnumerolla. Etualalla 12-pulssinen järjestelmä, keskellä ja takana kuusipulssiset.

4.2 18-pulssinen laitteisto

Siirryttäessä 18-pulssiseen järjestelmään verkkovirran yliaallot vähenevät verrattuna 12-pulssiseen. 18-pulssisessa järjestelmässä on rinnakkain tai sarjassa kolme kuusipulssista puolijohdesiltaa. Erilaisia laite- ja kytkentävaihtoehtoja on useita mahdollisia. Laitteisto voi koostua esimerkiksi rinnankytketyistä diodisilloista ja ensiöstä sarjaan kytketyistä

muuntajista tai sarjaan kytketyistä diodisilloista ja ensiöstä rinnankytketyistä muuntajista. Näillä eri järjestelmillä on omat hyvät ja huonot puolensa ja kytkentätavat voidaan valita sovelluskohtaisesti. Helpoin ymmärrettävä järjestelmäkokonaisuus on laitteisto, joka koostuu kolmesta rinnankytketystä kuusipulssisesta diodisillasta ja kolmesta ensiöstä rinnankytketystä muuntajasta. Seuraavaksi käsitellään tämän aidosti rinnan kytketyn laitteiston diodisilloja ja muuntajakytkentöjä.

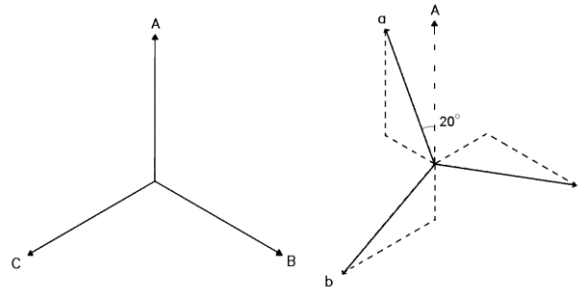
12-pulssinen järjestelmä vaatii 30° vaihesiirron siltojen välille tasaisen pulssisuuden takia. 18-pulssinen järjestelmä vaatii taas 20° vaihesiirron siltojen välille. [28] Abb Oy toimittaa järjestelmää, jossa on hyödynnetty kahta tähti-hakatahti(Yz)-kytkentää ja yhtä tähti-tähti(Yy)-kytkentää. [34] Yy-kytketyllä haaralla on samanlainen verkkovirran käyrämuoto kuin 12-pulssisessa järjestelmässä kuvassa 63 kuvatulla Dd-kytkennällä ja käytetään tuota käyrämuotoa myös 18-pulssisen järjestelmän Yy-haaran tarkastelussa. Koska Yy-kytkennällä ei ole vaihesiirtoa, vaihesiirto tulee luoda Yz-kytkennöillä siten, että toisella kytkennällä on $+20^\circ$ vaihesiirtoa Yy-kytkentään nähden ja toisella kytkennällä on -20° vaihesiirtoa Yy-kytkentään nähden. 18-pulssisen järjestelmän periaatekaavio on esitetty kuvassa 67. Kaikilla kolmella sillalla tulee olla yhtä suuri kuormitus jotta järjestelmä toimii parhaalla mahdollisella tavalla eikä ylimääräisiä yliaaltoja esiinny.



Kuva 67. 18-pulssisen järjestelmän periaate. Kuvassa kolme ensiöpuolelta rinnankytkettyä muuntajaa, joiden välillä on vaihesiirtoa sekä kolme kuusipulssista diodisiltaa jotka syöttävät yhteistä DC-piiriä rinnakkain. Jokaisen haaran verkkovirrat sekä koko laitteiston verkkovirta on hahmoteltu kuvaan.

4.2.1 $+20^\circ$ vaihesiirtävä muuntajahaara

Järjestelmän vaatima vaihesiirto saadaan aikaan muuntajan käämityksellä samaan tapaan kuten aiemmin kuvassa 58 esitettiin. Tässä tapauksessa ensiökäämitys on tähtikytkenäinen. Kuvassa 68 on esitetty $+20^\circ$ vaihesiirtävän muuntajakytkennän vektoridiagrammi.



Kuva 68. +20° vaihesiirtävän Yz-muuntajakytkennän vektordiagrammi.

Vaihesiirto rakentuu hakatahtikytkentää muokkaamalla siten, että toisiokäämin osien käämijännitteitä muutetaan. Esimerkiksi kuvassa 69 vaiheen a toisiokäämin toinen osa on pylväällä A ja toinen osa pylväällä B vastasuuntaan kytkettynä. Käämin osien jännitteet voidaan laskea kuvan 69 mukaisesti vektoreita ja sinilauseita käyttämällä. Jännitevektoreiden ja virtojen laskentaa on kuvattu Derek A. Paicen kirjassa *Power Electronic Converter Harmonics: Multipulse Methods For Clean Power*. Seuraava laskutoimitus on sovellettu kyseessä olevaan tähti-hakatahtimuuntajaan Paicen esittämästä tavasta laskea käämien kierrosluvut ja niissä esiintyvät virrat kolmion-polygonimuuntajassa[28].

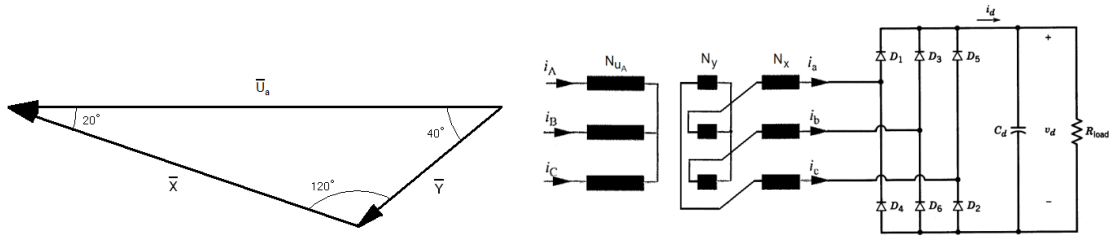
Kuvassa 69 esitetty +20° vaihesiirtävän muuntajakytkennän vektori \bar{U}_a on toisiojännitteen a vektori, \bar{X} on ensiön vaiheen A suuntainen jännitevektori, jolla on pituus x ja \bar{Y} on ensiövaiheen B vastasuuntaan kytketyn käämin osan jännitevektori, jolla on pituus y. Myöhemmän laskennon helpottamiseksi käytetään muuntajan muuntosuhteena arvoa 1:1 ja toisiovaiheen a jännitevektorin pituutena arvoa 1 eli $u_a = 1$.

Muuntajan virtoja laskettaessa yhden pylvään magnetomotoristen voimien summa tulee olla nolla [28], eli

$$i_A N_{u_A} - N_x i_a + N_y i_c = 0. \quad (31)$$

Etumerkit johtuvat käämien fyysisestä suunnasta pylväällä. Todellisessa muuntajassa, kuten edellä on todettu, toisiovaiheen a pidempi osa sijaitsee pylväällä A samaan suuntaan kytkettynä kuin ensiökäämi A ja lyhempi osa vastasuuntaan kytkettynä pylväällä B. Kuvan 69 virtojen suunnasta voi saada sen käsityksen, että toisiokäämin lyhempi osa on kytketty samaan suuntaan kuin ensiökäämi ja näin asia siis ei ole. Muuntajan toisio tulisi olla kuvassa vaakasuunnassa käännettynä jotta virtojen suunnat käämeissä olisivat realistiset, mutta piirrosteknisistä syistä kuva on näin havainnollisempi. Kaava 31 voidaan sieventää muotoon

$$i_A = \frac{N_x}{N_{u_A}} i_a - \frac{N_y}{N_{u_A}} i_c. \quad (32)$$



Kuva 69. Toisio- ja ensiöjännitteiden laskemiseen soveltuva vektorikolmio sekä muuntajan kytkentä.

Kuvan 69 kolmion sivujen laskemiseen käytettävän sinilauseen kaava on

$$\frac{1}{\sin 120^\circ} = \frac{y}{\sin 20^\circ} = \frac{x}{\sin 40^\circ}. \quad (33)$$

Tästä saadaan kolmion sivujen pituudet

$$y = \frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} \approx 0,3949 \quad (34)$$

ja

$$x = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} \approx 0,7422. \quad (35)$$

Sivujen x ja y pituudet tarkoittavat toisio- ja ensiöjännitevektoreiden pituutta ja ovat näin ollen suoraan verrannollisia toisiokäämin osien kierroslukuun. Luvut ovat suhdelukuja toisiojännitteen a vektorin pituuteen ja ensiöjännitteen A vektorin pituuteen ja käämin kierroslukuun, kun muuntajan muuntosuhde on 1:1. Tällöin $\frac{N_x}{N_{uA}} = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ}$ ja

$\frac{N_y}{N_{uA}} = \frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ}$, jolloin ensiö- ja toisiojännitteiden amplitudit ovat yhtä suuret. Kun nämä sijoitetaan ensiövirran yhtälöön 32, saadaan

$$i_A = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} i_a - \frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} i_c. \quad (36)$$

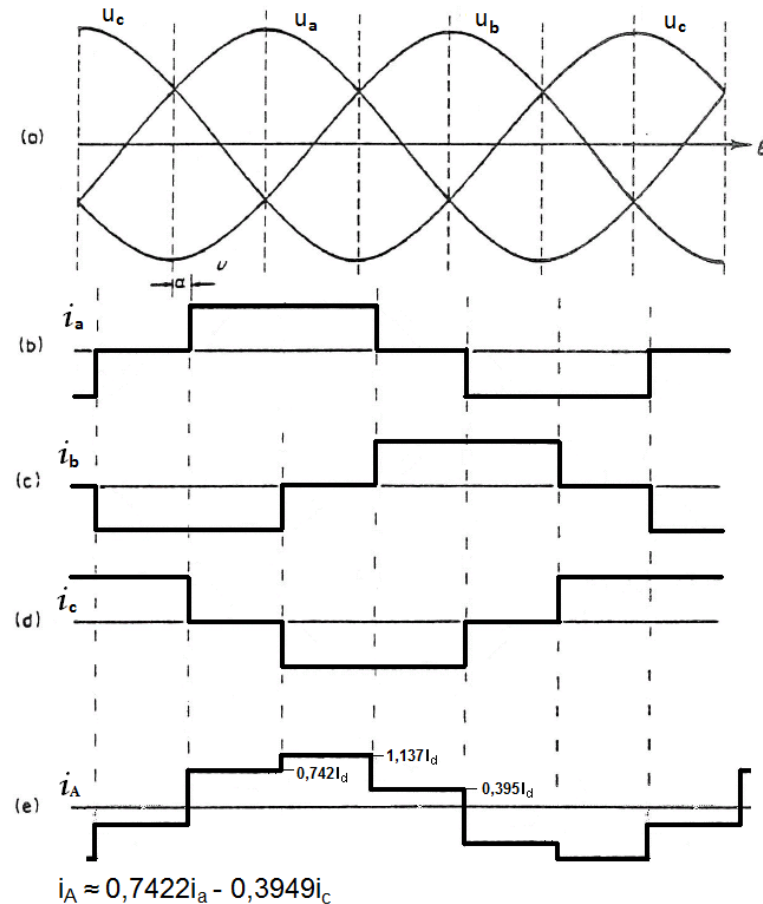
Samalla tavalla saadaan laskettua muidenkin vaiheiden virrat

$$i_B = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} i_b - \frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} i_a \quad (37)$$

ja

$$i_C = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} i_c - \frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} i_b. \quad (38)$$

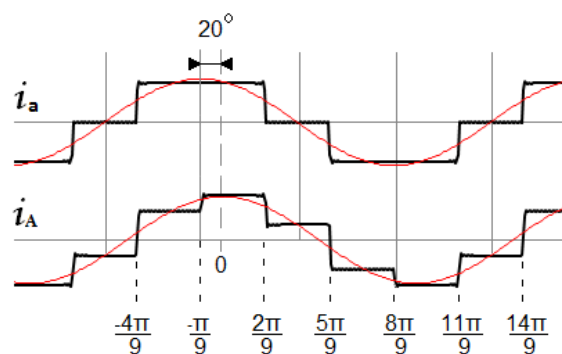
Näiden tulosten perusteella voidaan hahmotella vaihevirtojen muoto. Kuvassa 70 on kuusipulssisillan virrat sekä siihen liitetyn $+20^\circ$ vaihesiirtävän hakatähtimuuntajakytkennän yhden vaiheen verkkovirta. Kuvan verkkovirta on saatu laskemalla virtojen hetkellisarvoista kaavalla 36.



Kuva 70. kuusipulssidiodisillan ja $+20^\circ$ vaihesiirtävän muuntajan käyrämuotoja. a) Muuntajan toision jännitteet, b) Diodisillan a-vaiheen virta, c) Diodisillan b-vaiheen virta, d) Diodisillan c-vaiheen virta, e) Muuntajakytkennän A-vaiheen verkkovirta.

4.2.2 $+20^\circ$ vaihesiirtävän muuntajahaaran virran fourier-sarja

Kun 18-pulssisen järjestelmän haarat ovat kytkettyinä verkkoon, tulee jokaisen haaran perusaaltojen olla samassa vaiheessa. Kuvassa 71 on esitetty $+20^\circ$ vaihesiirtävän muuntajan ensiön ja toision välinen vaihesiirto. Tästä kuvasta nähdään, että toision virran i_a perusaalto on 20° ensiön virran i_A - eli verkkovirran- perusaaltoa edellä.



Kuva 71. $+20^\circ$ vaihesiirtävän muuntajan A-vaiheen ensiö- ja toisiovirrat perusaaltoineen.

Vaihevirran yliaaltosisältö voidaan laskea kuvan 71 perusteella fourier-sarjan avulla. Koska keskiarvo F_0 on jälleen nolla, sitä ei tarvitse ottaa huomioon. Tällä kertaa kuitenkin sarjassa esiintyy sekä kosini- että sinitermejä. Nyt ei myöskään riitä puolen jakson yli integroiminen, vaan täytyy integroida koko verkkojakson yli. Kosinitermit:

Merkitään selvyys vuoksi virtatasoja $a = \frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} I_d$ ja $b = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} I_d$.

$$a_h = \frac{1}{\pi} \left[\int_{-4\pi/9}^{-\pi/9} b \cos(h\omega t) d(\omega t) + \int_{-\pi/9}^{2\pi/9} (a+b) \cos(h\omega t) d(\omega t) \right. \\ \left. + \int_{2\pi/9}^{5\pi/9} a \cos(h\omega t) d(\omega t) - \int_{5\pi/9}^{8\pi/9} b \cos(h\omega t) d(\omega t) \right. \\ \left. - \int_{8\pi/9}^{11\pi/9} (a+b) \cos(h\omega t) d(\omega t) - \int_{11\pi/9}^{14\pi/9} a \cos(h\omega t) d(\omega t) \right] \quad (39)$$

$$a_h = \frac{1}{h\pi} \left[\int_{-4\pi/9}^{-\pi/9} b \sin(h\omega t) + \int_{-\pi/9}^{2\pi/9} (a+b) \sin(h\omega t) + \int_{2\pi/9}^{5\pi/9} a \sin(h\omega t) - \int_{5\pi/9}^{8\pi/9} b \sin(h\omega t) \right. \\ \left. - \int_{8\pi/9}^{11\pi/9} (a+b) \sin(h\omega t) - \int_{11\pi/9}^{14\pi/9} a \sin(h\omega t) \right] \quad (40)$$

Kun tämä lasketaan auki ja sijoitetaan $a = \frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} I_d$ ja $b = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} I_d$, saadaan

$$a_h = \frac{I_d}{h\pi} \left[\frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(\sin\left(h \frac{\pi}{9}\right) + \sin\left(h \frac{8\pi}{9}\right) - \sin\left(h \frac{14\pi}{9}\right) \right) \right. \\ \left. + \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(\sin\left(h \frac{2\pi}{9}\right) + \sin\left(h \frac{4\pi}{9}\right) - \sin\left(h \frac{11\pi}{9}\right) \right) + \frac{\sin 20^\circ + \sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \sin\left(h \frac{5\pi}{9}\right) \right] \quad (41)$$

Huomataan, että $a_h \neq 0$, kun $h = k6 \pm 1$, jossa $k = 0, 1, 2, \dots$

Lasketaan seuraavaksi sinitermit:

$$b_h = \frac{1}{\pi} \left[\int_{-4\pi/9}^{-\pi/9} b \sin(h\omega t) d(\omega t) + \int_{-\pi/9}^{2\pi/9} (a+b) \sin(h\omega t) d(\omega t) \right. \\ \left. + \int_{2\pi/9}^{5\pi/9} a \sin(h\omega t) d(\omega t) - \int_{5\pi/9}^{8\pi/9} b \sin(h\omega t) d(\omega t) \right. \\ \left. - \int_{8\pi/9}^{11\pi/9} (a+b) \sin(h\omega t) d(\omega t) - \int_{11\pi/9}^{14\pi/9} a \sin(h\omega t) d(\omega t) \right] \quad (42)$$

$$b_h = \frac{1}{h\pi} \left[-\left|_{-4\pi/9}^{-\pi/9} b \cos(h\omega t) - \left|_{-\pi/9}^{2\pi/9} (a+b) \cos(h\omega t) - \left|_{2\pi/9}^{5\pi/9} a \cos(h\omega t) + \left|_{5\pi/9}^{8\pi/9} b \cos(h\omega t) \right. \right. \right. \\ \left. \left. + \left|_{8\pi/9}^{11\pi/9} (a+b) \cos(h\omega t) + \left|_{11\pi/9}^{14\pi/9} a \cos(h\omega t) \right] \right] \quad (43)$$

Lasketaan auki ja sijoitetaan $a = \frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} I_d$ ja $b = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} I_d$.

$$b_h = \frac{I_d}{h\pi} \left[\frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(\cos\left(h\frac{\pi}{9}\right) - \cos\left(h\frac{8\pi}{9}\right) + \cos\left(h\frac{14\pi}{9}\right) \right) \right. \\ \left. + \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(-\cos\left(h\frac{2\pi}{9}\right) + \cos\left(h\frac{4\pi}{9}\right) + \cos\left(h\frac{11\pi}{9}\right) \right) - \frac{\sin 20^\circ + \sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \cos\left(h\frac{5\pi}{9}\right) \right] \quad (44)$$

Huomataan, että $b_h \neq 0$, kun $h = k6 \pm 1$, jossa $k = 1, 2, 4, 5, 7, \dots$
ja $b_h = 0$, kun $h = k18 \pm 1$ jossa $k = 0, 1, 2, \dots$ sekä kun $h = 2q$ ja kun $h = 3q$ joissa $q = 1, 2, \dots$

Lasketaan ensimmäiset kosini- ja sinitermit:

Ensimmäinen kosinitermi a_1 on

$$a_1 = \frac{I_d}{\pi} \left[\frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(\sin\left(\frac{\pi}{9}\right) + \sin\left(\frac{8\pi}{9}\right) - \sin\left(\frac{14\pi}{9}\right) \right) \right. \\ \left. + \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(\sin\left(\frac{2\pi}{9}\right) + \sin\left(\frac{4\pi}{9}\right) - \sin\left(\frac{11\pi}{9}\right) \right) + \frac{\sin 20^\circ + \sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \sin\left(\frac{5\pi}{9}\right) \right] \\ = \frac{4I_d \sin\left(\frac{\pi}{9}\right)}{\sqrt{3}\pi} \left[2 \sin\left(\frac{\pi}{9}\right) + \sin\left(\frac{4\pi}{9}\right) \left(1 + 2 \cos\left(\frac{\pi}{9}\right) \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \approx 1,1027 I_d. \quad (45)$$

Ensimmäinen esiintyvä sinitermi on viides termi b_5 , joka on

$$\begin{aligned}
b_5 &= \frac{I_d}{5\pi} \left[\frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(\cos\left(5 * \frac{\pi}{9}\right) - \cos\left(5 * \frac{8\pi}{9}\right) + \cos\left(5 * \frac{14\pi}{9}\right) \right) \right. \\
&\quad \left. + \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(-\cos\left(5 * \frac{2\pi}{9}\right) + \cos\left(5 * \frac{4\pi}{9}\right) + \cos\left(5 * \frac{11\pi}{9}\right) \right) - \frac{\sin 20^\circ + \sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \cos\left(5 * \frac{5\pi}{9}\right) \right] \\
&= \frac{2I_d}{5\pi\sqrt{3}} \left[2 \sin\left(\frac{\pi}{9}\right) \cos\left(\frac{5\pi}{9}\right) + \sin\left(\frac{4\pi}{9}\right) + \sqrt{3} \right] \approx 0,1910I_d. \quad (46)
\end{aligned}$$

Fourier-sarja on määritelmän mukaan

$$f(t) = F_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)\},$$

joka tässä tapauksessa sievenee muotoon

$$\begin{aligned}
i_{Yz+}(t) &= a_1 \cos(\omega t) + [a_5 \cos(5\omega t) + b_5 \sin(5\omega t)] + [a_7 \cos(7\omega t) + b_7 \sin(7\omega t)] + \dots \\
&= [a_1 \cos(\omega t) + a_5 \cos(5\omega t) + a_7 \cos(7\omega t) + \dots] \\
&\quad + [b_5 \sin(5\omega t) + b_7 \sin(7\omega t) + b_{11} \sin(11\omega t) + \dots]. \quad (47)
\end{aligned}$$

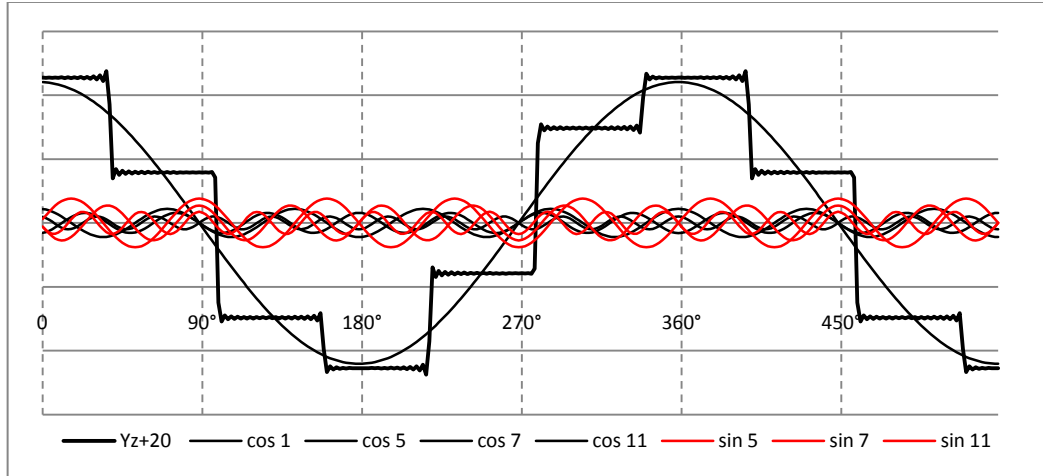
Kun lasketaan muuttujat a_1, a_5, a_7, \dots ja b_5, b_7, b_{11}, \dots ja sijoitetaan ne sarjan yhtälöön, saadaan fourier-sarjaksi

$$\begin{aligned}
i_{Yz+}(t) &\approx 1,1027 \frac{I_d}{2} \left[2 \cos(\omega t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega t) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t) + \frac{1}{11} \cos(11\omega t) - \dots \right] \\
&\quad + 0,1910I_d \left[\sin(5\omega t) - \frac{5}{7} \sin(7\omega t) - \frac{5}{11} \sin(11\omega t) + \frac{5}{13} \sin(13\omega t) + \dots \right] \quad (48)
\end{aligned}$$

Koska sarjalla ei ole lainkaan ensimmäisen kertaluvun sinitermiä, muuntajahaaran verkkovirran perusaalto on

$$i_1(t) \approx 1,1027I_d * \cos(\omega t). \quad (49)$$

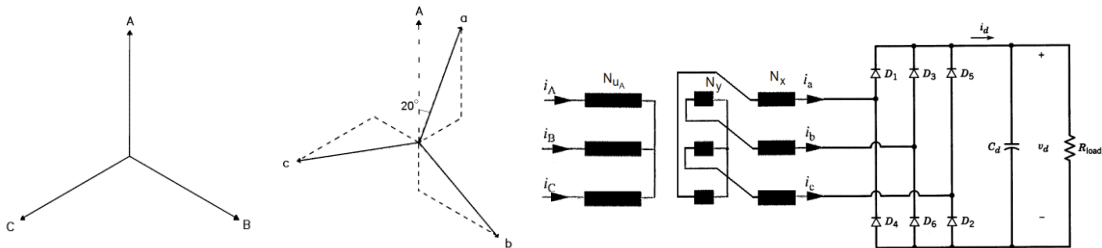
Perusaallon huippu on kohdassa $0^\circ \pm n2\pi$, koska se on kosinimuotoinen. Fourier-sarjan perusteella piirretty verkkovirran muoto on kuvassa 72.



Kuva 72. $+20^\circ$ vaihesiirtävän muuntajan fourier-sarjan perusteella piirretty verkkovirta. Mustalla paksulla viivalla esiintyvien sini- ja kosinitermien summa 100. yliaaltoon asti, mustalla ohuella viivalla esiintyvät kosinitermit 13. yliaaltoon asti ja punaisella viivalla esiintyvät sinitermit 11. yliaaltoon asti.

4.2.3 -20° vaihesiirtävä muuntajahaara

Toisen hakatähtikytkennän tarkastelu on hyvin samanlainen kuin edeltävänkin. Edellä muuntajan vaihesiirto oli $+20^\circ$, seuraavaksi tarkastellaan -20° vaihesiirtävää hakatähtikytkentää. Kuvassa 73 on -20° vaihesiirtävän muuntajan vektoridiagrammi sekä kytkentä.



Kuva 73. -20° vaihesiirtävän muuntajan vektoridiagrammi sekä kytkentä.

Tämän muuntajan tarkasteluun kelpaavat samat suhdeluvut (34 ja 35), jotka laskettiin toiselle muuntajalle. Käämit ovat eri järjestyksessä pylväillä ja näiden perusteella tehdään uudet yhtälöt virroille. Pylvään A virrat ovat

$$i_A N_{u_A} - N_x i_a + N_y i_b = 0, \quad (50)$$

josta saadaan vaiheen a verkkovirran yhtälö

$$i_A = \frac{N_x}{N_{u_A}} i_a - \frac{N_y}{N_{u_A}} i_b. \quad (51)$$

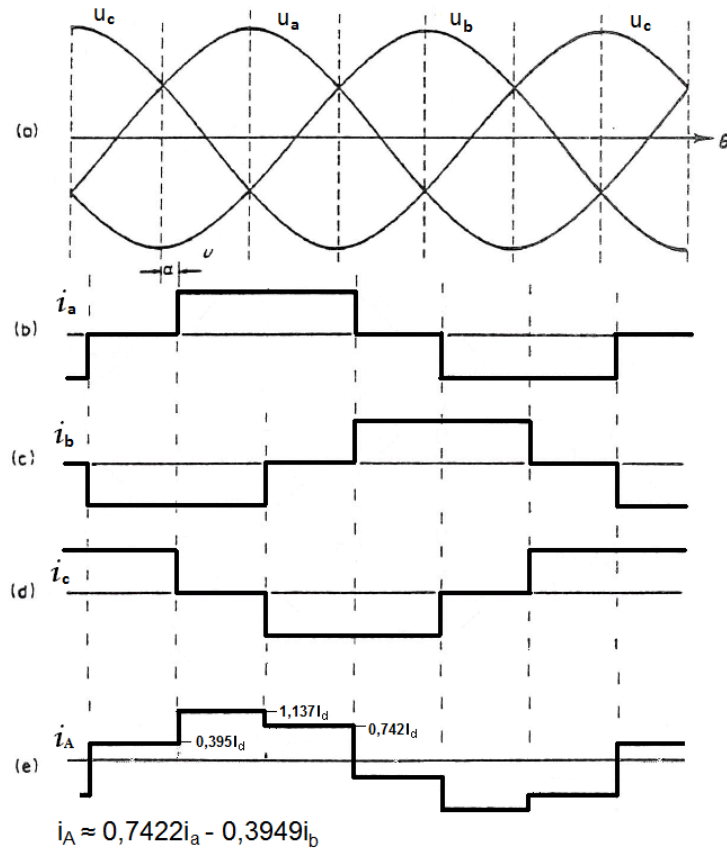
$$i_A = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} i_a - \frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} i_b \quad (52)$$

Samalla tavalla lasketaan B- ja C-vaiheiden verkkovirtojen yhtälöt

$$i_B = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} i_b - \frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} i_c \quad (53)$$

$$i_c = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} i_c - \frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} i_a. \quad (54)$$

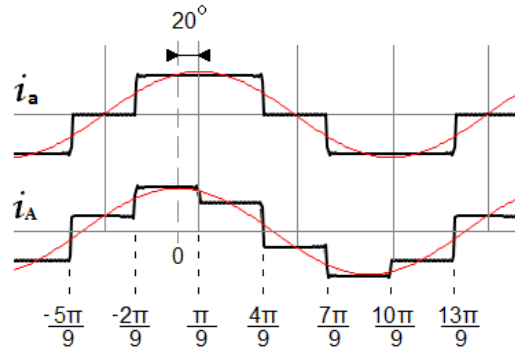
Näiden yhtälöiden perusteella voidaan piirtää verkkovirran käyrämuoto, kuten kuvassa 74 on tehty yhtälön 52 avulla.



Kuva 74. kuusipulssidiodisillan ja -20° vaihesiirtävän muuntajan käyrämuotoja. a) Muuntajan toision jännitteet, b) Diodisillan a-vaiheen virta, c) Diodisillan b-vaiheen virta, d) Diodisillan c-vaiheen virta, e) Muuntajakytkennän A-vaiheen verkkovirta.

4.2.4 -20° vaihesiirtävän muuntajahaaran virran fourier-sarja

Kuvasta 75 on nähdään, että -20° vaihesiirtävän muuntajan toision virran i_a perusaalto on 20° ensiön virran i_A - eli verkkovirran- perusaaltoa jäljessä. Tämän kuvan perusteella voidaan kirjoittaa tämänkin muuntajan verkkovirrälle fourier-sarja. Keskiarvo F_0 on jälleen nolla joten sitä ei tarvitse ottaa huomioon.



Kuva 75. -20° vaihesiirtävän muuntajan A-vaiheen ensiö- ja toisiovirrat perusaaltoineen.

Kosinitermit:

Merkitään jälleen virtatasot $a = \frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} I_d$ ja $b = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} I_d$.

$$a_h = \frac{1}{\pi} \left[\int_{-5\pi/9}^{-2\pi/9} a \cos(h\omega t) d(\omega t) + \int_{-2\pi/9}^{\pi/9} (a+b) \cos(h\omega t) d(\omega t) + \int_{\pi/9}^{4\pi/9} b \cos(h\omega t) d(\omega t) - \int_{4\pi/9}^{7\pi/9} a \cos(h\omega t) d(\omega t) - \int_{7\pi/9}^{10\pi/9} (a+b) \cos(h\omega t) d(\omega t) - \int_{10\pi/9}^{13\pi/9} b \cos(h\omega t) d(\omega t) \right] \quad (55)$$

$$a_h = \frac{1}{h\pi} \left[\int_{-5\pi/9}^{-2\pi/9} a \sin(h\omega t) + \int_{-2\pi/9}^{\pi/9} (a+b) \sin(h\omega t) + \int_{\pi/9}^{4\pi/9} b \sin(h\omega t) - \int_{4\pi/9}^{7\pi/9} a \sin(h\omega t) - \int_{7\pi/9}^{10\pi/9} (a+b) \sin(h\omega t) - \int_{10\pi/9}^{13\pi/9} b \sin(h\omega t) \right] \quad (56)$$

Lasketaan tämä auki ja sijoitetaan $a = \frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} I_d$ ja $b = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} I_d$ ja saadaan

$$a_h = \frac{I_d}{h\pi} \left[\frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(\sin\left(h\frac{\pi}{9}\right) + \sin\left(h\frac{5\pi}{9}\right) - \sin\left(h\frac{10\pi}{9}\right) \right) + \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(\sin\left(h\frac{2\pi}{9}\right) + \sin\left(h\frac{7\pi}{9}\right) - \sin\left(h\frac{13\pi}{9}\right) \right) + \frac{\sin 20^\circ + \sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \sin\left(h\frac{4\pi}{9}\right) \right]. \quad (57)$$

Huomataan, että $a_h \neq 0$, kun $h = k6 \pm 1$, jossa $k = 0, 1, 2, \dots$

Sinitermit:

$$b_h = \frac{1}{\pi} \left[\int_{-5\pi/9}^{-2\pi/9} a \sin(h\omega t) d(\omega t) + \int_{-2\pi/9}^{\pi/9} (a+b) \sin(h\omega t) d(\omega t) \right. \\ \left. + \int_{\pi/9}^{4\pi/9} b \sin(h\omega t) d(\omega t) - \int_{4\pi/9}^{7\pi/9} a \sin(h\omega t) d(\omega t) \right. \\ \left. - \int_{7\pi/9}^{10\pi/9} (a+b) \sin(h\omega t) d(\omega t) - \int_{10\pi/9}^{13\pi/9} b \sin(h\omega t) d(\omega t) \right] \quad (58)$$

$$b_h = \frac{1}{h\pi} \left[- \int_{-5\pi/9}^{-2\pi/9} a \cos(h\omega t) - \int_{-2\pi/9}^{\pi/9} (a+b) \cos(h\omega t) - \int_{\pi/9}^{4\pi/9} b \cos(h\omega t) + \int_{4\pi/9}^{7\pi/9} a \cos(h\omega t) \right. \\ \left. + \int_{7\pi/9}^{10\pi/9} (a+b) \cos(h\omega t) + \int_{10\pi/9}^{13\pi/9} b \cos(h\omega t) \right] \quad (59)$$

Lasketaan auki ja sijoitetaan $a = \frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} I_d$ ja $b = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} I_d$.

$$b_h = \frac{I_d}{h\pi} \left[\frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(-\cos\left(h\frac{\pi}{9}\right) + \cos\left(h\frac{5\pi}{9}\right) + \cos\left(h\frac{10\pi}{9}\right) \right) \right. \\ \left. + \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(\cos\left(h\frac{2\pi}{9}\right) - \cos\left(h\frac{7\pi}{9}\right) + \cos\left(h\frac{13\pi}{9}\right) \right) - \frac{\sin 20^\circ + \sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \cos\left(h\frac{4\pi}{9}\right) \right] \quad (60)$$

Huomataan, että $b_h \neq 0$, kun $h = k6 \pm 1$, jossa $k = 1, 2, 4, 5, 7, \dots$
ja $b_h = 0$, kun $h = k18 \pm 1$, jossa $k = 0, 1, 2, \dots$ sekä kun $h = 2q$ ja kun $h = 3q$,
joissa $q = 1, 2, \dots$

Lasketaan ensimmäiset kosini- ja sinitermit:

Ensimmäinen kosinitermi a_1 on

$$a_1 = \frac{I_d}{\pi} \left[\frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(\sin\left(\frac{\pi}{9}\right) + \sin\left(\frac{5\pi}{9}\right) - \sin\left(\frac{10\pi}{9}\right) \right) \right. \\ \left. + \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(\sin\left(\frac{2\pi}{9}\right) + \sin\left(\frac{7\pi}{9}\right) - \sin\left(\frac{13\pi}{9}\right) \right) + \frac{\sin 20^\circ + \sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \sin\left(\frac{4\pi}{9}\right) \right] \\ = \frac{4I_d \sin\left(\frac{\pi}{9}\right)}{\sqrt{3}\pi} \left[2 \sin\left(\frac{\pi}{9}\right) + \sin\left(\frac{4\pi}{9}\right) \left(1 + 2 \cos\left(\frac{\pi}{9}\right) \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \approx 1,1027 I_d. \quad (61)$$

Ensimmäinen esiintyvä sinitermi on viides termi b_5 , joka on

$$\begin{aligned}
b_5 &= \frac{I_d}{5\pi} \left[\frac{\sin 20^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(-\cos\left(5 * \frac{\pi}{9}\right) + \cos\left(5 * \frac{5\pi}{9}\right) + \cos\left(5 * \frac{10\pi}{9}\right) \right) \right. \\
&+ \frac{\sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \left(\cos\left(5 * \frac{2\pi}{9}\right) - \cos\left(5 * \frac{7\pi}{9}\right) + \cos\left(5 * \frac{13\pi}{9}\right) \right) - \frac{\sin 20^\circ + \sin 40^\circ}{\sin 120^\circ} * \cos\left(5 * \frac{4\pi}{9}\right) \left. \right] \\
&= -\frac{2I_d}{5\pi\sqrt{3}} \left[2 \sin\left(\frac{\pi}{9}\right) \cos\left(\frac{5\pi}{9}\right) + \sin\left(\frac{4\pi}{9}\right) + \sqrt{3} \right] \approx -0,1910I_d. \quad (62)
\end{aligned}$$

Fourier-sarja sievenee jälleen muotoon

$$\begin{aligned}
i_{Yz+}(t) &= [a_1 \cos(\omega t) + a_5 \cos(5\omega t) + a_7 \cos(7\omega t) + \dots] \\
&+ [b_5 \sin(5\omega t) + b_7 \sin(7\omega t) + b_{11} \sin(11\omega t) + \dots]. \quad (63)
\end{aligned}$$

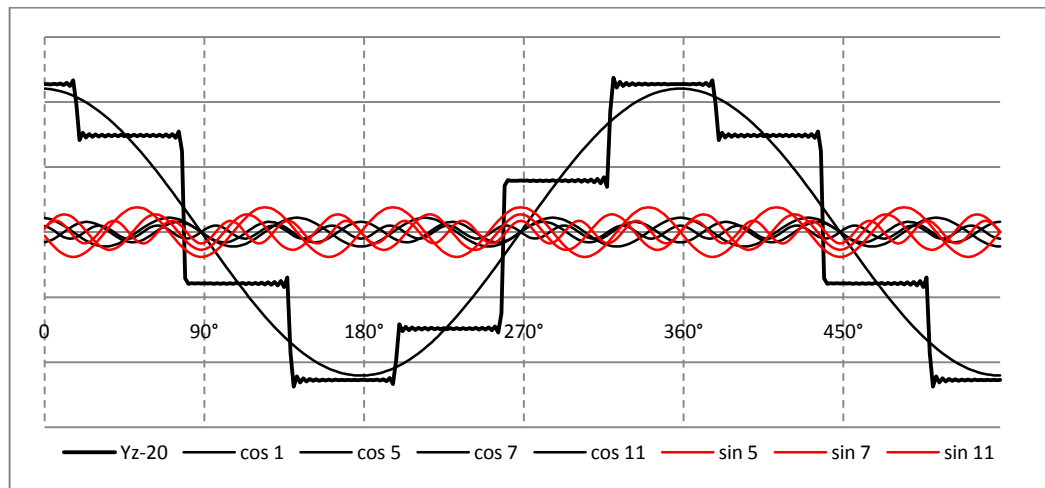
Kun lasketaan muuttujat a_1, a_5, a_7, \dots ja b_5, b_7, b_{11}, \dots ja sijoitetaan ne sarjan yhtälöön, saadaan fourier-sarjaksi

$$\begin{aligned}
i_{Yz-}(t) &\approx 1,1027 \frac{I_d}{2} \left[2 \cos(\omega t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega t) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t) + \frac{1}{11} \cos(11\omega t) - \dots \right] \\
&- 0,1910I_d \left[\sin(5\omega t) - \frac{5}{7} \sin(7\omega t) - \frac{5}{11} \sin(11\omega t) + \frac{5}{13} \sin(13\omega t) + \dots \right]. \quad (64)
\end{aligned}$$

Tälläkään muuntajahaaralla ei verkkovirran fourier-sarjalla ole ensimmäistä sinitermiä, joten perusaalto on suoraan ensimmäinen kosinitermi.

$$i_1(t) \approx 1,1027I_d * \cos(\omega t) \quad (65)$$

Perusaallon huippu on kohdassa $0^\circ \pm n2\pi$, koska se on kosinimuotoinen. Fourier-sarjan perusteella piirretty verkkovirran muoto on kuvassa 76.



Kuva 76. -20° vaihesiirtävän muuntajan fourier-sarjan perusteella piirretty verkkovirta. Mustalla paksulla viivalla esiintyvien sini- ja kosinitermien summa 100. yliaaltoon asti, mustalla ohuella viivalla esiintyvät kosinitermit 13. yliaaltoon asti ja punaisella viivalla esiintyvät sinitermit 11. yliaaltoon asti.

4.2.5 18-pulssisen järjestelmän virran fourier-sarja ja yliaaltosisältö

Yy-muuntajaa käyttävän järjestelmän fourier-sarja on jo laskettu edellä 12-pulssisen järjestelmän yhteydessä. Tässäkin käytettävän Yy-järjestelmän fourier-sarja on tuloksen 22 mukainen ja virran käyrämuoto kuvan 63 mukainen. Tässä vaiheessa huomataan, että Yy-järjestelmän perusaallon amplitudi tasavirralla I_d on $i_{1Yy} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \approx 1,1027 I_d$, jonka likiarvo on siis sama kuin käsiteltävillä Yz-kytkennöillä. Laskettaessa koko järjestelmän verkkovirtaa $i_{18p} = i_1 + i_2 + i_3 = i_{Yz-} + i_{Yy} + i_{Yz+}$ huomataan, että sarjojen sinitermit kumoavat toisensa ja että kumoutuvat kosinitermit ovat sarjoissa suhteessa toisiinsa

$$i_{Yz-(n)} : i_{Yy(n)} : i_{Yz+(n)} = -\frac{1}{2} : 1 : -\frac{1}{2}, \quad (66)$$

jossa n tarkoittaa yliaallon järjestyslukua ja $n \neq k18 \pm 1$, $k = 0, 1, 2, \dots$

Kun sarjat summataan keskenään, näiden kumoutuvien termien keskinäinen summa on siis

$$i_{Yz-(n)} + i_{Yy(n)} + i_{Yz+(n)} = -\frac{1}{2} + 1 + -\frac{1}{2} = 0. \quad (67)$$

Vielä kun otetaan huomioon, että järjestelmässä esiintyvät sinikomponentit kumoavat toisensa, saadaan 18-pulssisen dioditasasuuntaajan fourier-sarja sievennettyä muotoon

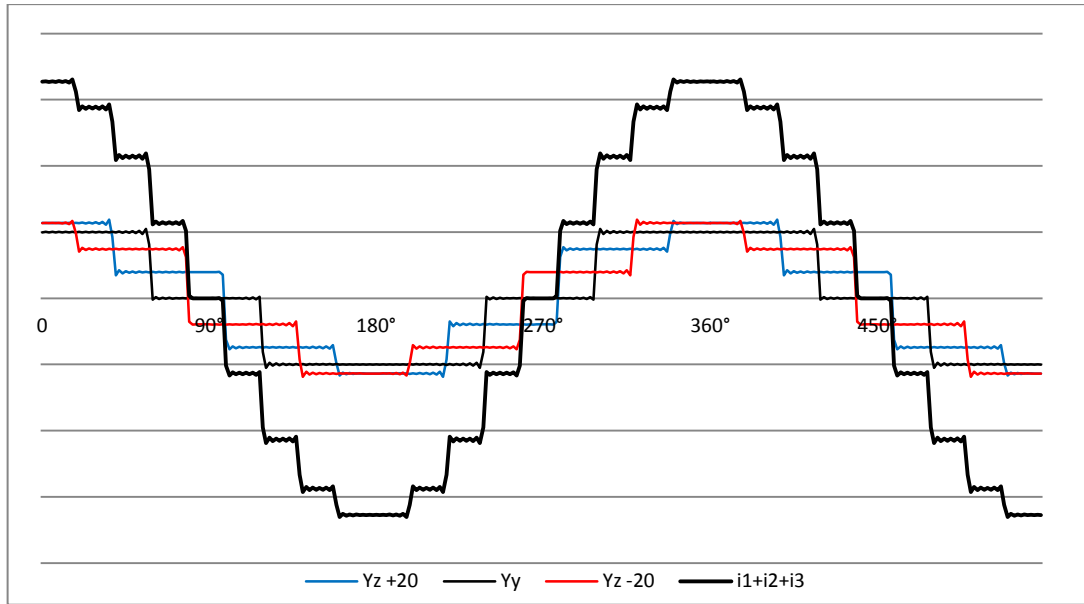
$$\begin{aligned} i_{18p}(t) &= (a_{1Yz-} + a_{1Yy} + a_{1Yz+}) + (a_{5Yz-} + b_{5Yz-} + a_{5Yy} + a_{5Yz+} + b_{5Yz+}) \\ &\quad + (a_{7Yz-} + b_{7Yz-} + a_{7Yy} + a_{7Yz+} + b_{7Yz+}) + \dots \\ &= (a_{1Yz-} + a_{1Yy} + a_{1Yz+}) + (a_{17Yz-} + a_{17Yy} + a_{17Yz+}) + (a_{19Yz-} + a_{19Yy} + a_{19Yz+}) + \dots \quad (68) \end{aligned}$$

Ja lopullinen fourier-sarja on

$$i_{18p}(t) \approx 3I_d * 1,1027 * \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{17} \cos(17\omega t) + \frac{1}{19} \cos(19\omega t) - \frac{1}{35} \cos(35\omega t) + \dots \right] \quad (69)$$

tulosta tutkimalla huomataan, että se on erisuuri kuin nolla, kun $h = \pm 18, \pm 36, \pm 54, \pm 72 \dots$ eli kun $h = k18 \pm 1$, jossa $k = 0, 1, 2, \dots$

Tämän fourier-sarjan perusteella on piirretty kuvaan 77 18-pulssisen järjestelmän verkkovirran käyrämuoto.



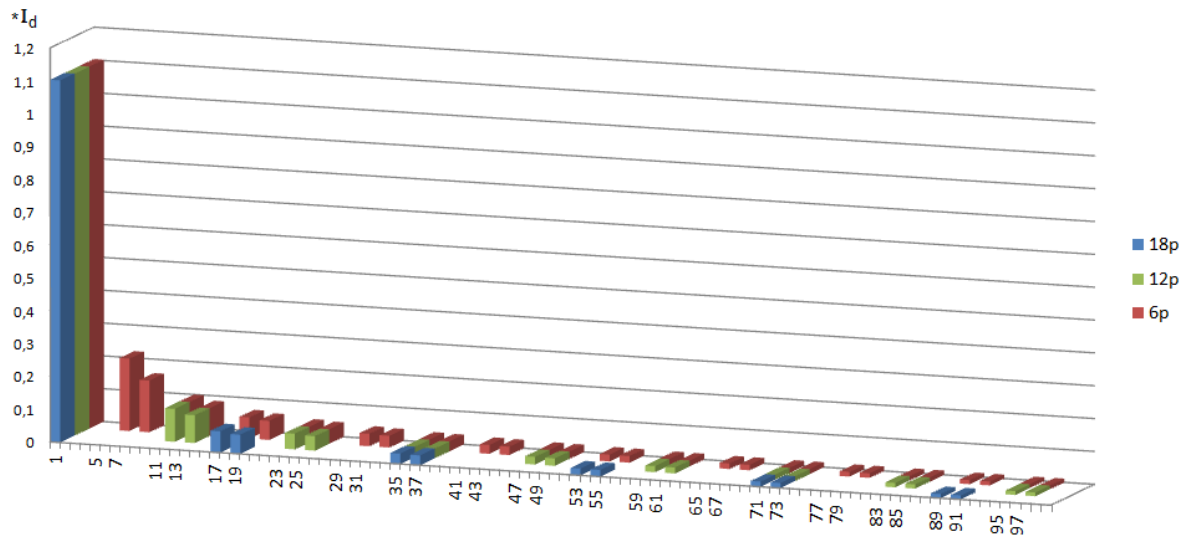
Kuva 77. Paksulla mustalla viivalla 18-pulssisen järjestelmän verkkovirta, ohuella mustalla viivalla Yy-haaran verkkovirta, sinisellä viivalla +20° vaihesiirtävän Yz-haaran verkkovirta ja punaisella viivalla -20° vaihesiirtävän Yz-haaran verkkovirta.

Kuvia 77 ja 65 vertaamalla voidaan todeta, että verkkovirran käyrämuoto on 18-pulssisella järjestelmällä lähempänä kosinimuotoista kuin 12-pulssisella järjestelmällä. Kuvasta 78 nähdään, miten suuria kuusi-, 12- ja 18-pulssisten järjestelmien yliaallot ovat, kun kullakin järjestelmällä on yhtä suuret verkkovirtojen perusaallot. 18-pulssista järjestelmää tarkasteltaessa voidaan todeta sama kuin 12-pulssisen järjestelmänkin kohdalla: Esiintyvien yliaaltojen amplitudit ovat yhtä suuret kuin samantaajuisilla yliaalloilla kuusi- ja 12-pulssiselläkin järjestelmällä, mutta esiintyviä yliaaltoja on vähemmän ja ne alkavat suuremmalta taajuudelta, millä on suuri merkitys alempitaajuisien yliaaltojen suuremman amplitudin vuoksi. Pulssiluvun kasvattamisen vaikutusta verkkovirran yliaaltosisältöön voi tarkastella myös vertailemalla järjestelmien harmonisia kokonaissäröjä eli THD-arvoja (Total Harmonic Distortion). THD voidaan laskea kaavalla 70 [15]. Kaavassa on yliaallot äärettömään asti, mutta käytetään kaavaa yliaaltosisällön vertailuun 100. yliaaltoon asti.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (70),$$

jossa I_1 on perusaallon tehollisarvo ja I_n on järjestysluvultaan n oleva yliaallon tehollisarvo.

Kaavalla lasketut arvot ovat taulukossa 15.



Kuva 78. Eri järjestelmien verkkovirran yliaaltosisällöt 100. yliaaltoon saakka. Edessä 18-pulssinen järjestelmä, keskellä 12-pulssinen järjestelmä ja takana kuusipulssinen järjestelmä.

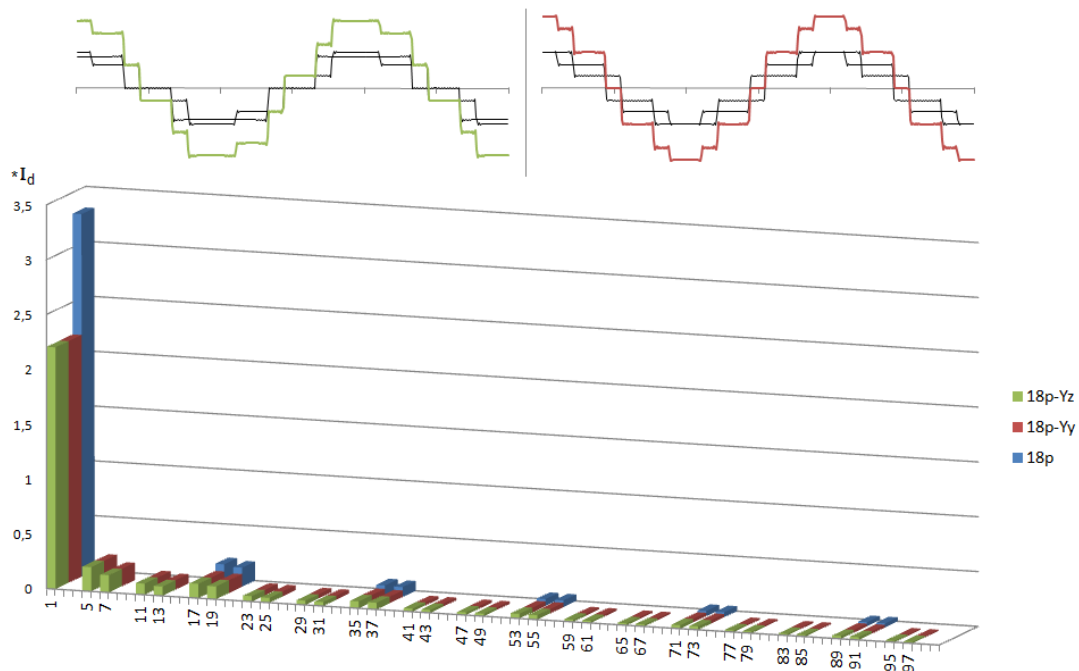
Taulukko 15. THD-arvojen vertailua kuusi-, 12-, ja 18-pulssisten järjestelmien välillä.

pulssiluku	THD %
6	30,5
12	14,7
18	9,5

4.3 Laitteiston käyttäminen yhden muuntajahaaran vikaantuessa

12- ja 18-pulssisen järjestelmän virran säröytyminen on pienintä silloin, kun järjestelmän haarojen kuormavirrat ovat saman suuruiset. 18-pulssisen järjestelmän suuren komponenttimäärän takia todennäköisyys jonkin osan vikaantumiselle kasvaa. Koska monipulssijärjestelmiä kannattaa käyttää lähinnä suuritehoisissa laitteissa, saattaa olla tärkeää, ettei laitteistoa tarvitse pysäyttää kokonaan jos laitteita on mahdollista käyttää edes vajaalla teholla jonkin haaran vikaantuessa. Tällainen tapaus on poikkeus, mutta on tarpeen tutkia, voiko näin tehdä edes hetkellisesti turhan haitan minimoimiseksi.

Vian sattuessa voidaan olettaa ettei vikaantunutta haaraa voi käyttää lainkaan ja tarvittava teho ohjataan kahden terveen haaran kautta. Oletetaan tarkastelussa, ettei terkeitä vaiheita ylikuormiteta ja kuormavirta voi olla tällöin vain 2/3-kertainen laitteiston nimellisvirtaan nähden. Virtojen laskeminen yhden haaran vikaantuessa tehdään samalla tavalla kuin kolmen haarankin tapauksessa, mutta vikaantuneen haaran virta jätetään pois. Kun summataan ehjien haarojen fourier-sarjat, saadaan piirrettyä kuvan 79 käyrämuodot ja diagrammi. Näistä voidaan laskea edelleen THD-arvot eri tilanteille kaavalla 70. Tulokset on esitetty taulukossa 16.



Kuva 79. Ylhäällä vasemmalla verkkovirran käyrämuoto ja etummaisena palkkirivinä esiintyvät yliaallot, kun $+20^\circ$ vaihesiirtävä Yz-haara on vikaantunut. Ylhäällä oikealla verkkovirran käyrämuoto ja keskimmäisenä palkkirivinä esiintyvät yliaallot, kun Yy-haara on vikaantunut. Takimmaisena palkkirivinä toimivan 18-pulssinen järjestelmän yliaaltosisältö.

Taulukko 16. Järjestelmien THD-arvot eri vikatilanteissa. Merkinnot vastaavat kuvan 79 merkintöjä.

Järjestelmä	THD %
18p	9,5
18p-Yz	17,3
18p-Yy	17,4

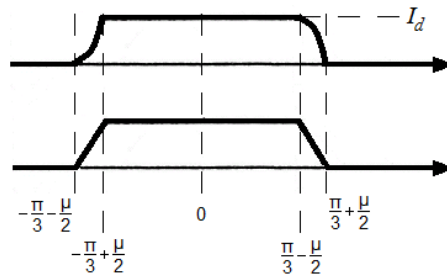
Huomataan, että yliaaltosisältö kasvaa ehjään tilanteeseen verraten 82 %. Vian satuessa kahta haaraa käyttävässä 18-pulssisessa järjestelmässä esiintyy myös 27 % enemmän yliaaltoja kuin 12-pulssisessa järjestelmässä.

Pulssinleveysmodulaatiota käyttävillä laitteilla yhden haaran vikaantuminen ei välttämättä lisää niin paljon yliaaltosisältöä, kuin diodisuuntaajien tapauksessa, sillä pulssikuvion valinnalla voidaan vaikuttaa yliaaltopitoisuuteen[15]. Kun yksi haara vikaantuu, voitaisiin vaihtaa ehjälle järjestelmälle optimoidusta pulssikuvioista kullekin vikatilanteelle räätälöityyn pulssikuvioon, jolloin suuritehoista järjestelmää ei välttämättä tarvitsisi sammuttaa.

4.4 Kommutoinnin vaikutus verkkovirran yliaaltopitoisuuteen

Kommutoinnin vaikutuksesta diodisillan aikaansaama verkkovirta ei ole täysin palkkimuotoista. Virtapalkin reunat pyöristyvät virran kommutoidessa diodilta toiselle kuten kuvassa 27 on esitetty. Tällä virtapalkin pyöristymisellä on virran yliaaltoja pie-

nantävä vaikutus ja sitä voidaan approksimoida kuvan 80 tapaan suoralla. Näin yliaalto- ja vähentävästä vaikutuksesta saadaan matemaattinen malli, joka vastaa hyvin oikeaa tulosta, jossa on käytetty virran tarkkaa yhtälöä. [15]



Kuva 80. Virran lineaarinen approksimaatio kommutoinnin aikana.

Mallin avulla voidaan johtaa yhtälö, jolla saadaan laskettua kunkin harmonisen yliaallon itseisarvon suuruudet I_n , kun tiedetään kommutointikulma μ .

$$[15] I_n = I_d \frac{\sqrt{2} \sin \frac{n\pi}{3}}{n\pi} \frac{\sin \frac{n\mu}{2}}{n\mu/2} \quad (71)$$

Yhtälöä tutkimalla voidaan todeta, että suuritaajuiset yliaallot vaimenevat enemmän kuin pienitaajuiset yliaallot. Kun yhtälöä käytetään kullekin diodisillalle erikseen ja yhdistetään haarat 18-pulssiseksi järjestelmäksi, kuten tähänkin asti, saadaan selville kommutointikulman vaikutus verkkovirran yliaaltoihin. Taulukkoon 17 on koottu kuusi-, 12- ja 18-pulssisten järjestelmien 100 ensimmäisen yliaallon THD-arvot kommutointikulmilla $\mu=0$ ja $\mu=10^\circ$. Taulukosta nähdään, että parannus on suurin juuri 18-pulssisella järjestelmällä. Tämä johtuu siitä, että kyseisessä järjestelmässä ei esiinny niin pienitaajuisia harmonisia, kuin kuusi- ja 12-pulssisilla järjestelmillä.

Talulukko 17. Verkkovirran kokonaissärö kommutointikulman arvoilla $\mu=0$ ja $\mu=10^\circ$.

Järjestelmä	THD %		Parannus %
	$\mu=0$	$\mu=10^\circ$	
6p	30,54	26,24	14,07
12p	14,67	10,24	30,19
18p	9,54	5,10	46,51

Esitelty 18-pulssinen järjestelmä ei käy voimantuotantoon, sillä diodisilta ei voi siirtää tehoa verkkoon päin. Järjestelmä esiteltiin diodisilloilla, jotta vaihesiirtävien muuntajien periaate tulisi selväksi lukijalle. Samoja vaihesiirtäviä muuntajia, joita tässä 18-pulssisessa järjestelmässä esiteltiin, voidaan käyttää voimantuotantoon, kunhan taajuusmuuttaja on sellainen, että sillä pystyy siirtää tehoa verkkoon päin. Tässä esiteltyä 18-pulssista järjestelmää tutkimalla voidaan todeta, ettei tällaista järjestelmää voida liittää sellaisenaan Suomen 110 kV verkkoon liian suuren yliaaltosisällön vuoksi. Megawattiluokan voimantuotannossa käytettäisiinkin taajuusmuuttajana kolmitasoista pulssinleveysmodulointia taajuusmuuttajaa, jotta tehoa saataisiin syötettyä verkkoon. Tässä työssä aiemmin esiteltyjen verkkokommutoitvien siltojen ja pulssinleveysmoduloidun kolmitasotekniikan ominaisuuksien perusteella voidaan todeta, että pulssinleveysmodulointia kolmitasotekniikkaa käytettäessä järjestelmän yliaaltosisältö on radikaalisti pie-

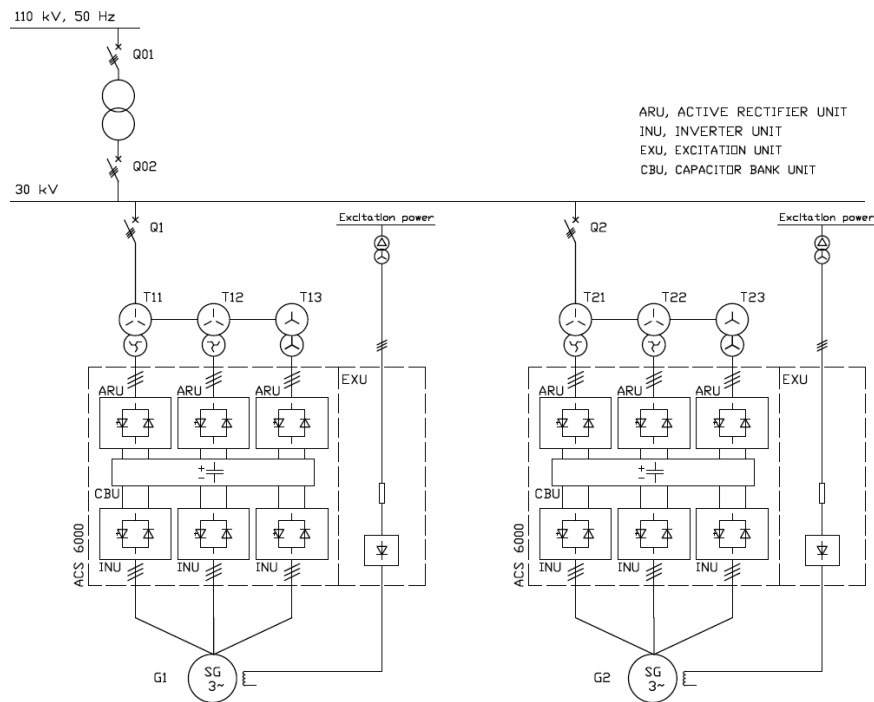
nempi, kuin diodisiltaa käytettäessä. Kolmitasoista pulssinleveysmodulointia käyttävät laitteet ovat pienellä suodattimella varustettuna yliaaltosisältönsä kannalta verkkokoodien mukaisia ja niissä käytetään monipulssimenetelmiä lähinnä siksi, että saadaan tehoa jaettua useammille puolijohdesilloille ja näin saadaan laitteiston tehoa kasvatettua. Monipulssimenetelmiä käyttämällä niidenkin yliaaltopitoisuudet toki vähenevät. Pienen yliaaltopitoisuuden vuoksi järjestelmään ei tarvitse lisätä erillistä verkkosuodatinta, mikä on edullista laitteiston hankintakustannusten ja hyötysuhteen kannalta.

5 Taajuusmuuttajan käyttö voimantuotannossa

Tässä osiossa esitellään eräs taajuusmuuttajalaitteisto sekä kaksi sovellusta, joissa taajuusmuuttajan käytöstä voi olla hyötyä. Laitteisto esitellään pääpiirteittäin, sillä laitteiston käyttämä tekniikka on tarkemmin esitelty työn edellisissä osioissa. Käyttösovellukset esitellään myös pääpiirteittäin ja pohditaan, miten kyseiset sovellukset voivat hyötyä taajuusmuuttajan käytöstä.

5.1 Taajuusmuuttajalaitteisto

Esimerkkilaitteistona taajuusmuuttajan käyttömahdollisuuksiin käytetään ABB:n ACS 6000- taajuusmuuttajaa. Tätä taajuusmuuttajaa myydään 6-, 12,- ja 18-pulssisena laitteistona ja 18-pulssisen laitteiston teho on näistä mahdollisuuksista suurin, 27 MVA. Esiteltävä ACS 6000 käyttää kolmitasoista pulssinleveysmodulointitekniikkaa sekä 18-pulssista muuntajalaitteistoa. Taajuusmuuttaja koostuu kolmesta 9 MVA tehoisesta verkkosillasta eli ARUsta (Active Rectifier Unit), välipiirin kondensaattoriparistosta eli CBU:sta (Capacitor Bank Unit) ja kolmesta 9 MVA tehoisesta generaattorisillasta eli INUsta (Inverter Unit). Kaikki ARUt ja INUt kytketään samaan tasajännitevälipiiriin CBU:ssa. Lisäksi tahtigeneraattorikäytössä taajuusmuuttajaan lisätään generaattorin ulkoinen magnetointiyksikkö EXU (Excitation Unit). Taajuusmuuttaja liitetään verkkoon vaihesiirtävän muuntajakokonaisuuden avulla, joka koostuu kolmesta erillisestä muuntajasta.[35] Nämä muuntajat on kytketty taajuusmuuttajan verkkosiltoihin kappaleen 4.2 tavalla sillä erolla, että muuntajien ensiökäämit ovat vaihekohtaisesti sarjassa. Muuntajan ensiön sarjaankytkentä aiheuttaa sen, ettei järjestelmää voi käyttää kahdella muuntajahaaralla kappaleessa 4.3 esitetyllä tavalla, sillä ensiössä vaikuttaisi ylijännite kahdella toimivalla haaralla [36]. Sarjaankytkennällä on muita etuja, esimerkiksi ensiön käämeihin kuluu vähemmän käämimateriaalia sarjaankytkennästä johtuvan muuntajakohtaisesti pienen ensiöjännitteen vuoksi. 18-pulssisessa järjestelmässä muuntajan ensiöjännite on vain kolmasosa verkon jännitteestä vaihekohtaisen sarjaankytkennän ansiosta. Tämän vuoksi ensiökäämin kierrosluku voi olla vain kolmasosa verkon jännitteiden mukaan lasketusta käämin kierrosluvusta. Kuvassa 81 on esitetty kahden generaattorin voimantuotantolaitoksen esimerkkikytkentä ACS 6000 -taajuusmuuttajalla.

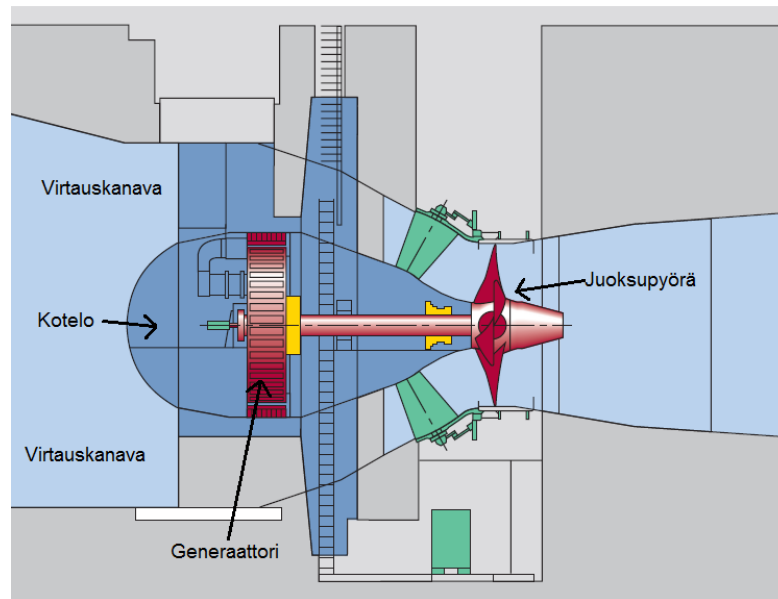


Kuva 81. Taajuusmuuttajan kytkentä kahden turbiinin voimalaitokseen.

Taajuusmuuttajatekniikasta voidaan hyötyä voimantuotantolaitoksissa, joiden työkooneen pyörimisnopeus on pieni. Tällaisia ovat matalan putouskorkeuden vesivoimalaitokset, joiden turbiinista voidaan saada suuria tehoja, vaikka putouskorkeudet eivät olekaan suuria. Tällöin virtaamat ovat suuria ja sopiva työkoone on putkiturbiini. Putkiturbiineista yleisimmät ovat kotelotyypinen(bulb) ja kuilutyypinen(pit) putkiturbiini. Näiden turbiinien ominainen pyörimisnopeus on matala, joten turbiinin tehon ollessa suuri vääntömomentti on myös suuri. Seuraavaksi esitetään, miten taajuusmuuttajatekniikkaa voidaan hyödyntää näiden voimalaitostyyppien yhteydessä.

5.2 Kotelotyypinen putkiturbiini

Kotelotyypisessä putkiturbiinissa on suora veto turbiinilta generaattorille, joka sijaitsee nimensä mukaisesti vesipisaran muotoisessa kotelossa virtauskanavan keskellä (kuva 82). Turbiinin pienen pyörimisnopeuden vuoksi generaattorin napojen määrän tulee olla suuri, jolloin generaattorin halkaisijasta tulee myös suuri. Esimerkiksi USA:n Ohiojokeen Bellevillen 2*25,9 MW tehoiseen laitokseen rakennetun kotelotyypisen laitoksen staattorin halkaisija on 7,45 metriä, kun juoksupyörän halkaisija on 7,5 metriä. Voimalaitoksen turbiinin pyörimisnopeus on 64,3 kierrosta minuutissa. [37]



Kuva 82. Kotelo- eli bulb-tyyppinen putkiturbiini. [38]

ABB Motors And Generators toimittaa enintään 30-napaisia 1 - 15 kV jännitteellä toimivia tahtigeneraattoreita teholuokassa 25 - 70 MVA[39]. Koska tällaisen generaattorin napapari-luku p on maksimissaan 15, saadaan kierrosnopeudella 64,3 rpm pyörivän generaattorin tuottamaksi taajuudeksi

$$f = pn = 15 * \frac{64,3}{60} \frac{1}{s} = 16,075 \text{ Hz. (72)}$$

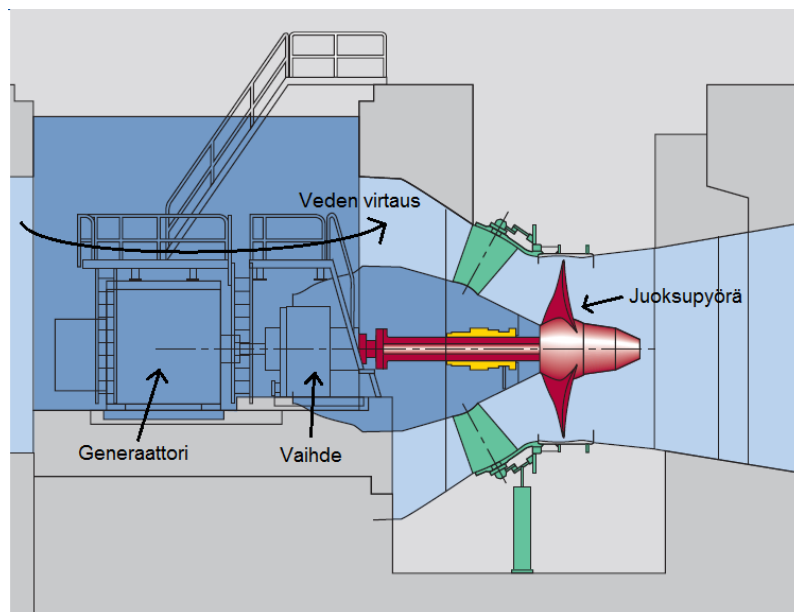
Tämä generaattori tulee liittää liian matalan taajuuden vuoksi taajuusmuuttajan kautta verkkoon. ACS 6000- taajuusmuuttajan pienin mahdollinen perustaajuus on 3,1 Hz, joten generaattorin tuottama 16,075 Hz on mahdollista liittää verkkoon tällä taajuusmuuttajalla. [35]

Näiden ABB:n generaattoreiden IEC:n (International Electrotechnical Commission) määrittelemä runkokoko on 2500 [39]. Lukuarvo 2500 tarkoittaa generaattorin akselin keskipisteen korkeutta moottorin jaloista millimetreinä [40]. Koska mitta on generaattorin jalkojen ja akselin keskipisteen väliltä, staattorin halkaisija on näissä generaattoreissa enintään 5 metriä. Koska generaattorin kokoa on mahdollista pienentää käyttämällä taajuusmuuttajan mahdollistamaa matalampaa taajuutta, saadaan generaattorikotelon halkaisijaa pienennettyä, jolloin kotelon veden virtausta vastustava voima pienenee ja turbiinin tehokkuus paranee. Generaattorikotelon ja generaattorin pienemisen vuoksi myös niiden hankintakustannuksia voidaan saada optimoitua paremmin verrattuna perinteiseen tekniikkaan. Toisaalta voimalarakennukseen täytyy taajuusmuuttajaa käytettäessä mahtua normaaleiden kytkinlaitteiden lisäksi taajuusmuuttaja sekä tarvittavat ARU-muuntajat, joten voimalarakennuksen rakentamiskustannukset saattavat nousta verrattuna perinteiseen laitokseen.

5.3 Kuilutyypinen putkiturbiini

Kuilutyypisessä putkiturbiinissa turbiinin etupuolella on virtauskanavan läpi pystysuunnassa ulottuva kotelo, jonka kummaltakin sivulta vesi virtaa turbiinille. Kuilutyypisen turbiinin generaattorikotelo pyritään rakentamaan kapeaksi, jotta vesi pääsisi vir-

taamaan mahdollisimman hyvin sen ohitse. Tästä syystä ei voida käyttää suurta suoravetoista generaattoria, vaan tulee valita pienikokoinen generaattori, jonka pyörimisnopeus on suurempi kuin suoravetoisella generaattorilla. Tällöin vaaditaan turbiinin ja generaattorin väliin pyörimisnopeutta nostava vaihde. Kuilutyyppisen putkiturbiinin periaate on esitetty kuvassa 83.



Kuva 83. Kuilu- eli pit-tyyppinen putkiturbiini. [38]

Taajuusmuuttajan avulla pieni generaattori, jonka ominainen pyörimisnopeus on liian suuri turbiinille, voidaan liittää suoraan hitaasti pyörivään akseliin, kun generaattorin taajuus voidaan muuttaa vastaamaan verkon taajuutta sähköisesti. Tällöin vaihdelaatikkaa ei tarvita lainkaan. Tällä voi olla edullinen vaikutus tuotantokatkoksen pituuteen, jos vaihteisto vikaantuisi. Bellevillen voimalaitoksen teholuokassa käytettävät vaihteistojen tulee olla niin suuria, että ne voivat olla voimalakohtaisesti räätälöityjä, joten niiden toimitusajat saattavat olla hyvin pitkiä. Jos esimerkiksi taajuusmuuttajalaitteiston yksi verkkosilta vikaantuu, voidaan vikaantunut silta vaihtaa huomattavasti nopeammin, kuin voimalaitoksen vaihteisto, sillä verkkosilta ei ole sovelluskohtaisesti räätälöity osa, eikä sen vaihtaminen ole yhtä työlästä ja aikaa vievää kuin vaihteiston vaihtaminen. Jos yksi taajuusmuuttajan muuntajista vikaantuu, on tuotantokatkos sillan vaihtamisen aiheuttamaa katkosta pidempi, sillä muuntajan toimitusajat voivat olla pitkiä. Muuntajan vikaantumistilannetta voidaan lievittää asentamalla voimalaitokseen yksi varamuuntaja, jonka kytkentäryhmää voidaan muuttaa siten, että varamuuntaja sopii kunkin kolmen muuntajan tilalle. Muuntajan vikaantuessa kyseisen muuntajahaaran ARU voidaan kytkeä kaapeleilla varamuuntajaan, joka edelleen kytketään kahden muun muuntajan ensiökäämeihin samalla tavalla, kuin vikaantunut muuntaja. Varamuuntajaa käytetään, kunnes uusi muuntaja saapuu ja varamuuntaja voidaan korvata. Näin muuntajan rikkoutumisesta aiheutunut tuotantokatkos saattaa lyhentyä huomattavasti.

6 yhteenveto

Työssä on perehdytty suuritehoisen taajuusmuuttajan verkkoliityntään voimantuotannossa. Aiheeseen liittyen tutkittiin verkkovaatimuksia Euroopassa liittyen perinteisiin voimalaitoksiin sekä taajuusmuuttajatekniikkaa käyttäviin voimalaitoksiin. Nykyisiä verkkovaatimuksia vertailtiin ja todettiin niiden eroavan toisistaan maiden ja synkronialueiden välillä vaihtelevasti. Työssä esiteltiin myös ENTSO-E:n luonnos yleisestä verkkokoodista Euroopassa taajuusmuuttajatekniikkaa käyttävien laitosten osalta. Tämän luonnoksen todettiin yhdentävän monilta osin nykyistä Euroopan alueen verkkosäännöstöä, vaikka esimerkiksi jänniterajojen osalta yhteisiä rajoja ei ole pystytty luomaan ENTSO-E:n uuteen verkkokoodiin.

Työssä tutkittiin myös taajuusmuuttajatekniikkaa ja vertailtiin tyypillisiä teknisiä ratkaisuja pienitehoisten ja suuritehoisten taajuusmuuttajien välillä. Raja pieni- ja suuritehoisten taajuusmuuttajien välille asetettiin pienjännitteisten ja keskijännitteisten laitteiden mukaan siten, että pienjännitteiset taajuusmuuttajat ovat pienitehoisia ja keskijännitteiset taajuusmuuttajat suuritehoisia. Taajuusmuuttajatekniikkaa käsittelevässä osiossa kuvattiin verkkokommutoivien siltojen sekä kaksi- ja kolmitasoisia jännitevälipiirejä käyttävien taajuusmuuttajien toimintaa ja esitettiin kolmitasoisista pulssinleveysmodulaatiota käyttävien taajuusmuuttajien pieni yliaaltopitoisuus. Työssä esitettiin verkkokommutoivan sillan yliaaltopitoisuus ja todettiin yliaaltopitoisuuden olevan radikaalisti suurempi verkkokommutoivalla sillalla, kuin kolmitasoisista pulssinleveysmodulaatiota käyttävällä verkkosillalla. Monipulssimenetelmien toimintaperiaatetta tutkittiin ja luotiin likiarvoiset fourier-sarjat 12- ja 18-pulssisille diodisilloille. Tämän osion lopuksi todettiin monipulssimenetelmien soveltuvan myös voimantuotantoon ja käytettäväksi kolmitasoisista pulssinleveysmodulaatiota käyttävän taajuusmuuttajan yhteydessä, jolloin saadaan järjestelmän tehoa kasvatettua kymmeneen megawattiin ja verkkovirran yliaaltopitoisuutta pienennettyä verrattuna tavalliseen kuusipulssiseen järjestelmään.

Lopuksi pohdittiin taajuusmuuttajatekniikan käyttämistä matalan korkeuden vesivoimalaitoksissa. Huomattiin taajuusmuuttajan sallivan turbiini pienen pyörimisnopeuden pienemmillä generaattorin napapariluvulla, kuin perinteinen tekniikka, mikä johtaa pienempään generaattorin halkaisijaan ja virtausteknisiin hyötyihin kotelo- eli bulb-tyyppistä putkiturbiinia käyttävässä vesivoimalaitoksessa. Todettiin myös mahdolliseksi poistaa turbiinin pyörimisnopeutta nostava vaihde kuilu- eli pit-tyyppistä putkiturbiinia käyttävässä vesivoimalaitoksessa, kun taajuusmuuttajatekniikkaa hyödynnetään. Nämä rakenteelliset muutokset kumpaankin vesivoimalatyyppiin saattavat tuoda mukanaan sekä taloudellisia että teknisiä hyötyjä.

Viitteet

- [1] Eurooppalaisen kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö ENTSO-E:n kotisivut: <http://www.entsoe.eu> (1.3.2012)
- [2] Tennet TSO GmbH, 2010. Grid Code: extra high voltage. Saksan kantaverkkoyhtiö TenneT:n verkkovaatimukset. Saatavilla: <http://www.tennet.org> (1.3.2012)
- [3] Fingrid Oyj. Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset 2007. Saatavilla: <http://www.fingrid.fi> (28.2.2012)
- [4] Technical Regulation for Thermal Power Station Units of 1.5 MW and higher: Regulation for grid connection TF 3.2.3, 2008. Tanskan kantaverkkoyhtiö Energinet.dk:n verkkovaatimukset 1,5 MW ja isommille lämpövoimalaitoksille. Saatavilla: <http://www.energinet.dk> (28.2.2012)
- [5] Jason MacDowell, GE Energy, 2009. Installations connected to a power transmission system and generating equipment: Minimum design requirements, equipment, operations, commissioning and safety. Espanjan kantaverkkoyhtiön verkkovaatimusten luonnoksen epävirallinen käännös. Saatavilla: http://http://www.nerc.com/docs/pc/ivgtf/Spanish%20Grid%20Code_En_Translation.pdf (28.2.2012)
- [6] VDN. TransmissionCode 2007. Verband der Netzbetreiber - VDN – e.V. beim VDEW, Berliini. Saksan verkko-operaattoreiden yhdistyksen VDN:n yhteiset verkkovaatimukset. Saatavilla: <http://www.vde.com> (28.2.2012)
- [7] Iso-Britannian kantaverkkoyhtiö National Gridin kotisivut: <http://www.nationalgrid.com> (1.3.2012)
- [8] SONI Ltd. SONI Grid Code, 2012. Pohjois-Irlannin kantaverkkoyhtiö SONIn verkkovaatimukset. Saatavilla: <http://http://www.soni.ltd.uk> (28.2.2012)
- [9] EirGrid Plc. EirGrid Grid Code, 2011. Irlannin kantaverkkoyhtiö EirGridin verkkovaatimukset. Saatavilla: <http://http://www.eirgrid.com> (28.2.2012)
- [10] National Grid. The Grid Code, 2012. Iso-Britannian kantaverkkoyhtiö National Gridin verkkovaatimukset. Saatavilla: <http://www.nationalgrid.com> (28.2.2012)
- [11] Energinet.dk. Technical Regulation 3.2.5 for wind power plants with a power output greater than 11 kW, 2010. Tanskan kantaverkkoyhtiö Energinet.dk:n verkkovaatimukset tuulivoimaloille, joiden teho on suurempi kuin 11 kW. Saatavilla: <http://www.energinet.dk> (28.2.2012)
- [12] Fingrid Oyj. Fingridin 110 kV verkon sähkönlaatu. Raportti, 2007. Saatavilla: <http://www.fingrid.fi> (9.3.2012)
- [13] ENTSO-E. ENTSO-E Draft Network Code For Requirements For Grid Connection Applicable To All Generators, 24.1.2012. Eurooppalaisten kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö ENTSO-E:n luonnos yleisestä eurooppalaisesta verkkokoodista, joka pätee kaikille generaattorityypeille. Saatavilla: <http://www.entsoe.eu> (9.3.2012)
- [14] Mohan, Underland, Robbins, 2003. Power Electronics: Converters, Applications and design. John Wiley & Sons, New York, USA. 802 s. ISBN 0-471-42908-2
- [15] Jorma Kyrrä, 2010. Suuntaajatekniikka. Opetusmoniste. Aalto-yliopiston teknillisen korkeakoulun sähkötekniikan laitoksen julkaisu, Otaniemi. 320 s.

- [16] Jorma Kyyrä, 2009. Tehoelektroniikka-kurssin luentokalvot, Otaniemi.
- [17] Andrzej M. Trzynadlowski, 1998. Introdyction to Modern Power Electronics. John Wiley & Sons. 425 s. ISBN 0-471-15303-6
- [18] Jorma Kyyrä, 2011. Hakkuritekniikka-kurssin luentokalvot, Otaniemi.
- [19] Jouko Niiranen, 1980. Pakkokommutoidun pulssitasasuuntaajan mitoitus ja konstruointi laboratorikäyttöön. Diplomityö, Teknillinen Korkeakoulu, Helsinki.
- [20] Fang Lin Luo, Hong Ye, 2010. Power Electronics: Advanced Conversion Technologies. Taylor & Francis Group, Boca Raton. 722 s. ISBN 978-1-4200-9429-9
- [21] Kuvat piirtänyt Mikko Risku lähteen 19 perusteella. Kuvat hyväksynyt lähdeeteoksen tekijä Jouko Niiranen 25.1.2012.
- [22] Muhammad H. Rashid, 2011. Power Electronics Handbook, Third Edition. Elsevier. 1390 s. ISBN 978-0-12-382036-5. Chapter 12: Three-Phase Controlled Rectifiers. Juan Dixon. Saatavilla: <http://web.ing.puc.cl/~power/publications/electronics.htm>. Viitattu 26.1.2012.
- [23] Philippe Maibach, Alexander Faulstich, Markus Eichler, Stephen Dewar. Full-Scale Medium-Voltage Converters for Wind Power Generators up to 7 MVA. ABB Switzerland Ltd Turgi, Switzerland. Saatavilla: <http://http://www.scribd.com/doc/61993909/Full-scale-Medium-Voltage-Converters-Mva>. (27.1.2012)
- [24] Tero Viitanen, 2003. Kolmivaiheinen PWM-Tasasuuntaus: Kokosilta- Ja Vienna-Suuntaajan Vertailu. Lisensiaatintutkimus, Tampereen Teknillinen Yliopisto, Sähkötekniikan Osasto.
- [25] D. Grahame Holmes, Thomas A. Lipo, 2003. Pulse Width Modulation For Power Converters. John Wiley & Sons, New York. 724 s. ISBN 0-471-20814-0
- [26] Tero Viitanen, ABB Drives. Sähköpostikeskustelu 6.2.2012.
- [27] Björn Backlund, Stephan Ebner, 2011. The wind power converter for tomorrow is already here. ABB Switzerland Ltd Turgi, Switzerland. Saatavilla: <http://www.abb.fi> (28.3.2012)
- [28] Derek A. Paice, 1996. Power Electronic Converter Harmonics: Multipulse Methods For Clean Power. IEEE Press, New York, USA. 202 s. ISBN 0-7803-1137-X
- [29] ABB Oy Transformers, 2004. ABB Transformer handbook. Zürich.
- [30] Jorma Luomi, Jouko Niiranen, Asko Niemenmaa, 2007. Sähkömekaniikka ja sähkökäytöt Osa 1. Opetusmoniste. Teknillinen korkeakoulu, Sähkömekaniikan laboratorio, Espoo. 166 s.
- [31] Matti Lehtonen, 2009. Sähköverkot-kurssin luentokalvot, Otaniemi.
- [32] Jorma Kyyrä, 2009. Tehoelektroniikka-kurssin laskuharjoitukset, Otaniemi. Opetusmoniste.
- [33] Arrillaga, Bradley, Bodger, 1985. Power System Harmonics. John Wiley & Sons. 336 s. ISBN 0 471 90640 9

- [34] ABB OY Transformers. Technical specification. 2008. Vaasa.
- [35] ABB Oy (2004). Technical catalog: ACS 6000 Medium Voltage Drives. Rev. C. ABB Switzerland Ltd. 173 s.
- [36] Pasi Tallinen. Suunnittelija. ABB Transformers. Haastattelu 16.2.2012.
- [37] VA Tech Hydro. Water.Power.Large. Vesiturbiinivalmistajan esite. Saatavilla: <http://pdf.directindustry.com/pdf/andritz-ag-pumps-division/bulb-turbines-generators/26150-99288.html> (21.3.2012)
- [38] Voith Siemens Hydro Power Generation GmbH & Co. KG. Bulb/Pit/S-turbines and generators. Esite. Saatavilla: http://energieuitwater.files.wordpress.com/2008/01/vs_3181e_bulb_pit.pdf (21.3.2012)
- [39] ABB Motors And Generators, 2011. Synchronous generators for diesel and gas engines. Esite. Saatavilla: <http://www.abb.fi> (21.3.2012)
- [40] ABB OY, 2004. Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja.